

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
Теплоенергетичний факультет  
Кафедра теоретичної і промислової теплотехніки

«На правах рукопису»

УДК 534.24

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Геннадій ВАРЛАМОВ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

## **Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»

на тему: Гідродинаміка і тепло-масообмін в газорідинному контактному апараті з ежекційною подачею води.

Виконала: студентка II курсу, групи ТП – 81 мп

ПАНЧЕНКО Оксана Олексіївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., Петро БАРАБАШ \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Консультант з мат. моделювання к.т.н. Андрій СОЛОМАХА \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, ім'я, прізвище) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Теплоенергетичний

Кафедра Теоретичної і промислової теплотехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

ОНП «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Геннадій ВАРЛАМОВ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Панченко Оксані Олексіївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації Гідродинаміка і тепло-масообмін в газорідинному контактному апараті з ежекційною подачею води,

науковий керівник дисертації Барабаш Петро Олексійович, к.т.н., доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 16 » березня 2020 р. № 863-с

2. Термін подання студентом дисертації 15.05.2020 р.

3. Об'єкт дослідження Газорідинний контактний апарат з ежекційною подачею води

4. Предмет дослідження Аналіз процесів тепломасообміну в контактному апараті з ежекційною подачею води в робочу зону; знаходження оптимальних умов та режимів роботи установки.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Проаналізувати актуальність використання контактних апаратів з ежекційною подачею води в робочу зону, дослідити режими течії в установці, провести термодинамічний розрахунок апарату та оцінити ефективність його роботи, дослідити гідравлічні характеристики контактного апарату

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Принципова схема контактної установки з ежекційною подачею води, зображення режимів роботи установки, графіки аналізу результатів проведених дослідів.

7. Орієнтовний перелік публікацій Стаття у журналі «ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ» - 1 шт. Патент на корисну модель – 2 шт. Тези доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях – 4 шт. Конкурсна робота «Молодь енергетиці» - 2 шт.

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
мат. моделювання	Андрій Соломаха, доцент		

9. Дата видачі завдання 8 березня 2020 року

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Отримання завдання	08.03.2020	
2.	Літературний огляд	18.03.2020	
3.	Розробка установки та контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону	31.05.2020	
4.	Дослідження характерних режимів течії та умов їх виникнення	06.05.2020	
5.	Розрахунок теплообміну в контактному апараті з ежекційною подачею рідини в робочу зону	20.04.2020	
6.	Дослідження газодинаміки контактного апарата в середовищі	02.05.2020	
7.	Розроблення стартап-проєкту	10.05.2020	
8.	Оформлення та подання дисертації	15.05.2020	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Оксана ПАНЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Петро БАРАБАШ

(ім'я, прізвище)

---

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-науковою програмою підготовки на тему «Гідродинаміка і тепло-масообмін в газорідинному контактному апараті з ежекційною подачею води»: 91 с., 47 рис., 18 табл., 3 додатка, 27 джерел.

Об'єкт дослідження: газорідинний контактний апарат з ежекційною подачею води.

Мета роботи: оцінка ефективності контактних апаратів; дослідження контактного апарату з ежекційною подачею рідини в робочу зону, визначення найбільш вигідної комплектації досліджуваного апарату; дослідження розподілу повітря та значення його швидкості в контактному апараті.

Актуальність роботи визначається новизною конструкції установки та зацікавленістю промислових підприємств у зменшенні енерговитрат і капіталовкладень, зменшенні шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Задачі дослідження: визначити геометричні характеристики контактного апарату з ежекційною подачею рідини в робочу зону, виконати експериментальні дослідження та дослідити режими течії в контактному апараті, провести комп'ютерне моделювання аеродинамічних процесів в пристрої, розрахувати коефіцієнт масовіддачі.

Методами дослідження: експериментальне дослідження газорідинного контактного апарату, комп'ютерне моделювання аеродинамічних процесів повітря в досліджуваному апараті, методика дослідження тепломасообміну в апараті.

Наукова новизна роботи полягає в оригінальному підводі рідини в робочу зону контактного теплообмінного апарату. Нова технологія дозволяє збільшити продуктивність газорідинного апарату за рахунок супутнього руху плівки рідини і потоку газу.

Ключові слова: контактний апарат, водоповітряний потік, ежекційна подача рідини, плівка рідини, режим течії, барботаж, захлинання, тепломасообмін, коефіцієнт масовіддачі.

## ANNOTATION

Master's thesis for a master's degree in educational and scientific training program on the topic "Hydrodynamics and heat and mass transfer in a gas-liquid contact apparatus with ejection water supply": 91 pp., 47 fig., 18 table., 3 applications, 27 sources.

Object of study: gas-liquid contact apparatus with ejection water supply.

Purpose of work: assessment of the effectiveness of contact devices; research of the contact apparatus with ejection fluid supply to the working area, determination of the most favorable configuration of the apparatus under study; studies of the distribution of air and the value of its speed in the contact apparatus.

The relevance of the work is determined by the novelty of the installation design and the interest of industrial enterprises in reducing energy costs and investment, reducing harmful emissions into the environment.

Research objectives: to determine the geometric characteristics of the contact apparatus with ejection fluid supply to the working area, to carry out experimental studies and to study the flow regimes in the contact apparatus, to conduct computer simulation of the aerodynamic processes in the device, to calculate the mass transfer coefficient.

Research methods: experimental study of a gas-liquid contact apparatus, computer simulation of the aerodynamic processes of air in the apparatus under study, methods for studying heat and mass transfer in the apparatus.

The scientific novelty of the work lies in the original supply of fluid to the working area of the contact heat exchanger. The new technology allows to increase the productivity of the gas-liquid apparatus due to the concomitant motion of the liquid film i gas stream.

Key words: contact device, water-air flow, ejection fluid supply, liquid film, flow regime, bubbling, flooding, heat and mass transfer, mass transfer coefficient

## АНОТАЦИЯ

Магистерская диссертация на соискание степени магистра по образовательно-научной программе подготовки на тему «Гидродинамика и тепло-массообмен в газожидкостном контактном аппарате с эжекционной подачей воды»: 91 с., 47 рис., 18 табл., 3 приложения, 27 источников.

Объект исследования: газожидкостный контактный аппарат с эжекционной подачей воды.

Цель работы: оценка эффективности контактных аппаратов; исследования контактного аппарата с эжекционной подачей жидкости в рабочую зону, определение наиболее выгодной комплектации исследуемого аппарата; исследования распределения воздуха и значение его скорости в контактном аппарате.

Актуальность работы определяется новизной конструкции установки и заинтересованностью промышленных предприятий в уменьшении энергозатрат и капиталовложений, уменьшении вредных выбросов в окружающую среду.

Задачи исследования: определить геометрические характеристики контактного аппарата с эжекционной подачей жидкости в рабочую зону, выполнить экспериментальные исследования и исследовать режимы течения в контактном аппарате, провести компьютерное моделирование аэродинамических процессов в устройстве, рассчитать коэффициент массоотдачи.

Методы исследования: экспериментальное исследование газожидкостного контактного аппарата, компьютерное моделирование аэродинамических процессов воздуха в исследуемом аппарате, методика исследования тепломассообмена в аппарате.

Научная новизна работы заключается в оригинальном подводе жидкости в рабочую зону контактного теплообменного аппарата. Новая технология позволяет увеличить производительность газожидкостного аппарата за счет сопутствующего движения пленки жидкости и потока газа.

Ключевые слова: контактный аппарат, водовоздушный поток, эжекционная подача жидкости, пленка жидкости, режим течения, барботаж, захлебывания, тепломассообмен, коэффициент массоотдачи.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів .....	8
Вступ .....	10
1 Теплообмінні апарати контактного типу .....	12
1.1 Загальні відомості про теплообмінні апарати .....	12
1.2 Види контактних апаратів .....	14
1.3 Прямі контактні теплообмінники .....	19
1.4 Апарати та пристрої з безпосереднім контактом газового і рідкого середовищ .....	25
1.5 Тепломасообмін у контактних апаратах .....	29
1.6 Висновки та постановка задач .....	32
2 Розробка установки та контактного апарата з ежекторною подачею рідини в робочу зону ....	34
2.1 Опис установки.....	34
2.2 Переваги контактного апарата з ежекторною подачею рідини в робочу зону .....	37
2.3 Гідрогазодинаміка в контактному апараті з ежекторною подачею рідини в робочу зону ..	39
2.4 Дослідження характерних режимів течії та умов їх виникнення .....	41
2.5 Тепломасообмін у контактному апараті .....	49
2.6 Результати дослідження тепломасообміну .....	54
2.7 Висновки до розділу 2.....	58
3 Дослідження руху повітря в моделі контактного теплообмінного апарату в SolidWorks.....	60
3.1 Постановка задачі.....	60
3.2 Створення геометричної моделі .....	60
3.3 Проведення дослідів та їх аналіз .....	63
3.4 Висновки до розділу 3.....	71
4 Розробка стартап-проєкту .....	72
4.1 Резюме проєкту.....	72
4.2 Організація проєкту .....	73
4.3 Канва моделі стартап-проєкт .....	73

4.4 Ключові види діяльності проєкту .....	75
4.5 Ціннісні пропозиції та споживачі .....	76
4.6 Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту .....	79
4.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проєкту .....	79
4.8 План робіт та партнери стартап-проєкту .....	81
4.9 Грошовий потік та економічна оцінка стартап-проєкту.....	82
4.10 Висновки до розділу 4 .....	84
Висновки .....	85
Список використаної літератури .....	87
Додатки	
Додаток А	
Технічне завдання на науково - дослідну роботу .....	89
Додаток Б	
Акт впровадження .....	90
Додаток В	
Список наукових праць.....	91
Додаток Г	
Перевірка на академічний плагіат .....	93



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

### Умовні позначення:

$\alpha$  – коефіцієнт явного теплообміну, коефіцієнт тепловіддачі;  
 $\sigma$  – коефіцієнт повного теплообміну, коефіцієнт поверхневого натягу;  
 $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі;  
 $\zeta$  – коефіцієнт, який враховує вплив форми вхідної кромки;  
 $G$  – масова витрата;  
 $V$  – об’ємна витрата повітря;  
 $Q$  – кількість теплоти;  
 $W$  – швидкість;  
 $\rho$  – густина;  
 $d$  – вологовміст; діаметр;  
 $\varphi$  – відносна вологість;  
 $t$  – температура;  
 $c$  – питома теплоємність;  
 $i$  – ентальпія;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $x$  – тиск газового і рідинного ротаметрів;  
 $P$  – тиск;  
 $B$  – барометричний тиск;  
 $F$  – площа поверхні;  
 $\delta$  – товщина;  
 $l$  – довжина;  
 $n$  – кількість;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $Fr$  – число Фруда;  
 $Ka$  – число Капіці;  
 $Km$  – критерій рівняння тепломасообміну;  
 $\Pi$  – ціна;  
 $K$  – капіталовкладення.

**Основні нижні індекси:**

кр – критичний;

ср – середнє значення;

с – сухий;

м – мокрий;

п – повітря;

р – рідина;

мас – масова;

заг – загальна.

**Скорочення:**

ВЕР – вторинні енергоресурси.

## ВСТУП

В даний час сучасні досягнення науково-технічного прогресу, з одного боку, сприяють задоволенню потреб суспільства в цілому і кожного індивіда окремо, з іншого боку, негативно впливають на процеси, що протікають в біосфері, ведуть до порушення її стабільності. Екологічна проблема світу стосується всіх технічних аспектів. Потреби в енергії ростуть з кожною хвилиною, а запаси невідновлюваних природних ресурсів дуже швидко зменшуються. Тому проблема енергозбереження та ефективного використання енергоресурсів є найбільш актуальною на сучасному етапі розвитку енергетики України та світу в цілому. Майже всі країни світу шукають нову енергію, в той же час вони також приділяють більше уваги розвитку енергозберігаючих технологій.

Теплообмінні апарати займають важливе місце в промисловій теплоенергетиці і складають виключно численну групу теплосилового обладнання, займаючи значні виробничі площі та перевищуючи часто 50% вартості загальної комплектації в теплоенергетиці, хімічній, нафтопереробній промисловості та ряді інших галузей. Отже, для вирішення такої актуальної проблеми для промислової теплоенергетики як раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів необхідне створення нового економічного обладнання: зниження його металоємності і габаритів, підвищення ефективності та надійності його роботи.

Для досягнення поставлених цілей поліпшення характеристик теплоенергетичного обладнання необхідно розробляти нові конструкції теплообмінних апаратів: збільшувати ефективність теплообмінних поверхонь, застосовувати сучасні підходи до проектування теплообмінних апаратів, створювати нові технології їх виробництва. Тому правильний вибір теплообмінників і їх теплообмінних поверхонь є дуже важливим завданням.

За останні тридцять років успіху досягли контактні теплообмінні апарати. Фактично, завдяки їх конфігурації, яка забезпечує прямий контакт між гарячим і холодним середовищами, можна досягти дуже високої ефективності перенесення маси і енергії.

Більшість питань підвищення ефективності роботи контактних апаратів пов'язано з тепло- і масообміном між рідиною та газом. Розвиток нових сучасних технологій потребує глибокого вивчення процесу тепломасообміну при високій турбулізації фаз, що контактують між собою. Основним критерієм розробки нових вискоефективних контактних апаратів є інтенсифікація процесу тепломасообміну та зменшення капітальних затрат.

Зазвичай всі методи інтенсифікації теплообміну пов'язані з ростом гідравлічного опору. При цьому підвищення ефективності теплообміну на 30-40% веде до зростання опору на 40-60%. Отже, важливою є задача пошуку геометрії теплообмінних поверхонь які забезпечать найбільше

значення коефіцієнта тепловіддачі при мінімально можливому значенні коефіцієнта гідравлічного опору (потужності, що витрачається на прокачування теплоносія).

Одним із шляхів інтенсифікації тепломасообмінних процесів в різних апаратах енергетики та теплотехнології є застосування апаратів і пристроїв, в яких процеси тепломасообміну в газорідних системах відбуваються в умовах безпосереднього контакту газової і рідкої середовищ. Останнім часом такі апарати і пристрої широко застосовуються в якості контактних випарників різних розчинів і водонагрівачів, контактних утилізаторів теплоти відхідних виробничих газів і парогазових сумішей з конденсацією в них пари, плівкових охолоджувачів води (градирнях), плівкових охолоджувачів і осушувачів повітря (кондиціонери) і т.д. Для ефективної реалізації переваг робочих процесів в подібних пристроях необхідно знати основні закономірності фундаментальних гідравлічних і тепломасообмінних процесів, властивих певному виду використовуваної газорідної системи.

У роботі наведено дослідження і аналіз ефективності роботи контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону, який дозволяє збільшити енергоефективність установок та зменшити капіталовкладення.

## **1 ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ КОНТАКТНОГО ТИПУ**

### **1.1 Загальні відомості про теплообмінні апарати**

На сьогоднішній день визначальним фактором у виборі стратегії технічного і технологічного удосконалення роботи підприємств є ефективне використання теплової енергії. При заміні або закупівлі нового обладнання головними критеріями вибору стають: відношення ціни і якості, надійність і довгостривалість роботи обладнання, екологічні та економічні показники. Тому сьогодні в енергетиці актуальності набувають високоякісні теплообмінні апарати, які задовільняють всі потреби і виконують поставлені задачі.

На сучасному етапі розвитку людства проблема взаємодії енергетики і навколишнього середовища набуває нових рис, поширюючи вплив на величезні території, більшість річок і озер, величезні обсяги атмосфери і гідросфери Землі. Ще більш значні масштаби розвитку енергопостачання і енергоспоживання в доступному для огляду майбутньому зумовлюють подальший інтенсивний ріст їх різноманітних впливів на всі компоненти природного середовища в глобальному масштабі. Тому вплив забруднення теплообмінника на навколишнє середовище не менш важливий, ніж економічний вплив. Міжнародні договори про скорочення забруднення навколишнього середовища привели до значного зростання дослідів з цього питання в останні роки.

А також при виборі відповідного обладнання повинна враховуватись техніко-економічна складова, яка повинна бути доведена і обґрунтована. Ефективне використання енергоресурсів дозволяє знизити ціну на продукцію.

Правильний вибір теплообмінного апарату є гарантом якісної роботи підприємства при мінімальних витратах.

#### **1.1.1 Критерії вибору теплообмінних апаратів**

Аналіз процесу вибору теплообмінних апаратів має базуватись на ясному розумінні критеріїв, за якими буде перевірятись їх робота[1].

Першим критерієм задовільної роботи теплообмінного апарата є виконання вимог до робочих параметрів: потрібна теплопродуктивність має забезпечуватись під час роботи від одного профілактичного ремонту до іншого за заданих обмежень за перепадом тисків теплоносіїв незалежно від забруднення поверхні теплообміну.

Другий критерій полягає у тому, що теплообмінник повинен задовольняти умови, які висуваються для всього обладнання. Сюди входять, передусім, механічні навантаження, пов'язані

не лише з нормальною роботою, а й з транспортуванням, запуском, зупинкою, а також рядом певних операцій, спричинюваних порушенням виробничого процесу, включаючи можливі аварійні ситуації. До них належать, в тому числі, механічні напруги, викликані перехідними режимами під час зміни температури теплоносіїв. В теплообміннику не повинна виникати корозія від дії теплоносіїв та навколишнього середовища. Забруднення поверхні теплообміну мають бути мінімальними, хоча засоби запобігання відкладанням звичайно обмежені застосуванням найвищих швидкостей теплоносіїв, допустимих за перепадом тисків та обмеженням через ерозію поверхні теплообміну і вібраціям, а також гарантуванням того, що забруднена поверхня буде максимально доступна для очищення.

Третій критерій являє собою вимогу можливості періодичного ремонту теплообмінника, до якого входять очищення поверхонь теплообміну, заміна складових цих поверхонь, ущільнень та інших елементів конструкції, що особливо піддаються дії корозії, ерозії, вібрації та старіння. Ця вимога може також стати причиною обмеження щодо розміщення теплообмінника та забезпечення вільного простору навколо нього. При цьому слід враховувати переваги багатосекційного компонування з відсічними клапанами, що дає можливість ремонтувати окремі секції без зупинки апарата в цілому.

Четвертий критерій зводиться до того, що теплообмінник повинен мати мінімальну вартість за умови відповідності попереднім критеріям. Але з огляду на економію на вартості апарата слід мати на увазі, що збільшення експлуатаційних витрат внаслідок зменшення розмірів та зниження надійності апарата може перевищити виграш на початковій вартості.

### 1.1.2 Типи теплообмінних апаратів

Теплообмінники використовуються для передачі тепла від одного середовища до іншого. Ці середовища можуть бути газом, рідиною або їх комбінацією. Теплообмінники підвищують енергоефективність системи, передаючи тепло від систем, де воно не потрібне, до інших систем, де його можна використовувати з користю.

Іншим поширеним застосуванням теплообмінників є попереднє нагрівання холодної рідини, що надходить в нагріту технологічну систему, з використанням тепла від гарячої рідини, що виходить із системи. Це зменшує енерговитрати, необхідні для нагріву рідини, що поступає до робочої температури.

Передача теплоти може здійснюватися при безпосередньому контакті обох теплоносіїв, або через тверду поверхню, що розділяє середовища. За цією ознакою теплообмінні апарати відповідно поділяються на контактні і поверхневі. У змішувальних апаратах теплообмін відбувається одночасно з масообміном. У поверхневих апаратах процес теплопередачі включає

в себе тепловіддачу від первинного теплоносія до поверхні теплообміну, перенесення теплоти через поверхню і тепловіддачу від поверхні теплообміну до вторинного теплоносія.

Теплообмінники змішування (контактні) в порівнянні з поверхневими при однаковому тепловому навантаженні є більш компактними через більш високу інтенсивність теплообміну. Більш висока інтенсивність теплообміну в теплообмінниках змішування обумовлена безпосереднім контактом теплоносіїв, відсутністю розподілу їх стінки (тобто відсутністю термічного опору).

## **1.2 Види контактних апаратів**

На практиці контактні теплообмінники найчастіше застосовуються для теплообміну між газовим (паровим) і рідким теплоносієм. Найбільш широко застосовуються розпилювальні, барботажні, плівкові, насадкові і струменеві апарати.

Використання контактних теплообмінників дозволяє значно понизити витрату металів і інших дефіцитних матеріалів, капітальні і експлуатаційні витрати, підвищити надійність устаткування.

Контактні теплообмінники призначені [2]:

- для нагріву води гарячими димовими газами;
- для охолодження рідин (переважно повітрям);
- для охолодження розплавів з метою їх кристалізації і одержання гранульованого продукту;
- для нагріву зернистих матеріалів топковими газами і використання зернистого шару часток в якості проміжного теплоносія.

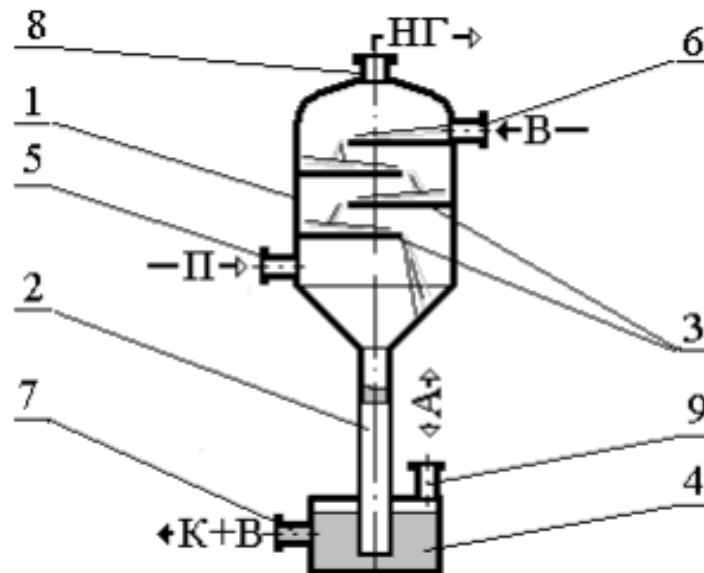
Контактні теплообмінники використовують для концентрації (випаровування) агресивних розчинів продуктами згорання газу, при конденсації пари з метою утилізації тепла. У контактних теплообмінниках теплові процеси можуть протікати як без зміни агрегатного стану теплоносіїв, так і з його зміною (при випаровуванні, конденсації, кристалізації).

Контактні апарати широко застосовуються в якості контактних випарників і нагрівачів різних розчинів, контактних утилізаторів теплоти газів, що відходять, зволожувачів в кондиціонерах і ін.

Контактні апарати в свою чергу поділяються на змішуючі, в яких теплообмін відбувається при змішуванні обох теплоносіїв, і барботажні, де один з теплоносіїв прокачується через інший без змішування.

В даний час досить поширені струменеві теплообмінники змішування. Вони в основному використовуються в енергетиці в якості конденсаторів і в теплофікації як підігрівачі мережної

води. Барометричний конденсатор, показаний на рисунку 1.1, широко використовується при необхідності конденсації водяної пари, що утворюється в вакуумних апаратах і установках. Апарат призначений для роботи під зниженим тиском. Тому він має конструкцію, що забезпечує малий гідравлічний опір проходу пара.



1 - корпус 2 - барометрична труба; 3 - полки; 4 - барометричний ящик; 5 - штуцер для входу пара; 6 - штуцер для подачі води; 7 - штуцер для відводу суміші конденсату і води; 8 - штуцер для відводу газів; 9 - штуцер повідомлення з атмосферою.

Потоки: П - пар; В - вода; До + В - суміш конденсату і води;

НГ – несконденсовані гази; А - повідомлення з атмосферою

Рисунок 1.1 - Барометричний конденсатор

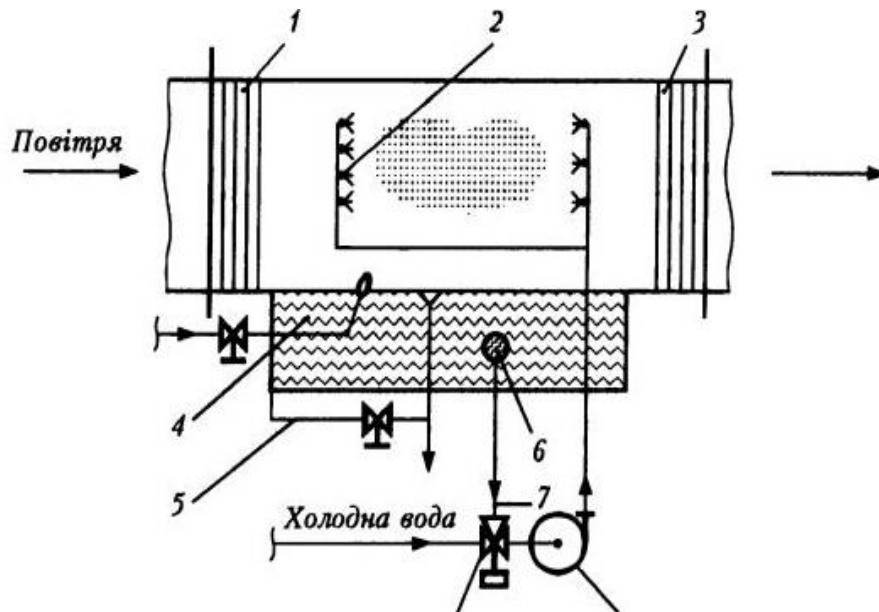
Змішувальні теплообмінники можуть бути порожнистими та з насадкою. Поверхня насадки в цьому випадку не є поверхнею теплообміну, а призначена лише для організації руху плівки рідкої фази.

Найпростішими і компактнішими є змішуючі теплообмінники, в яких змішуються теплоносії, які не потребують подальшого розділення, наприклад, під час підігрівання холодної води гарячою водою або навпаки, під час охолодження гарячої води холодною (змішувальний теплообмінник зображений на рисунку 1.2) [3].

Використовуються змішувальні теплообмінники і для теплоносіїв, що легко розділяються, наприклад, газ (повітря) - рідина (вода). Для збільшення поверхні контакту теплоносіїв рідину (воду) розбризкують в потоці газу (повітря). Для цього використовують вентиляторні градирні



(вентиляторна градирня зображена на рисунку 1.3), в яких охолоджують повітрям воду завдяки її випаровуванню, та іншу апаратуру [3].

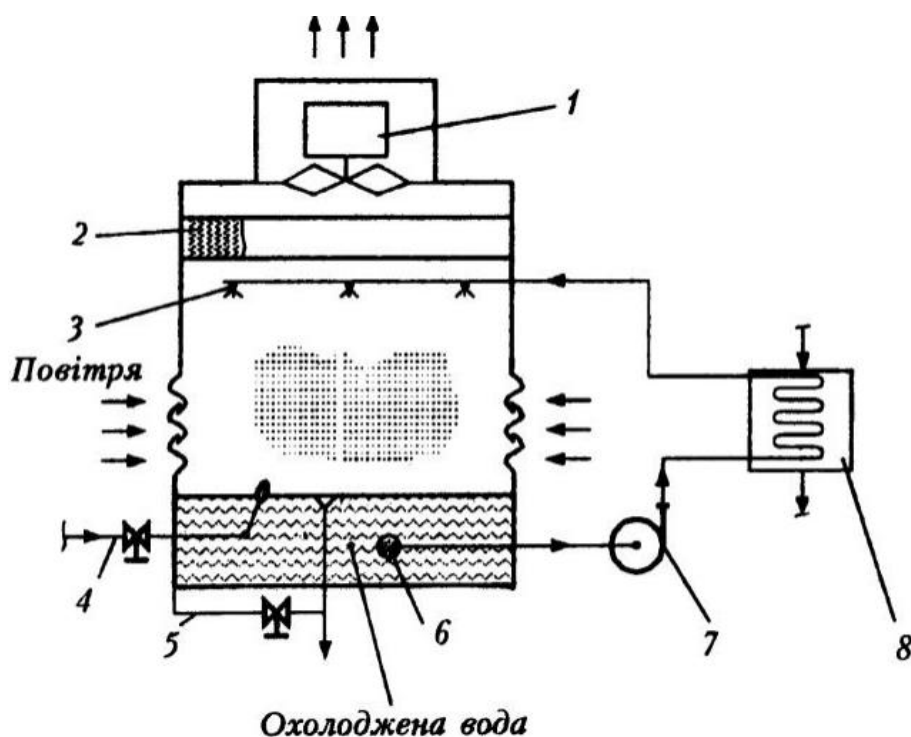


З – змішувач прямої та зворотної води для гарячого водопостачання; ЕЗ – ежектор-змішувач (елеватор) для підтримання допустимої температури води в системах опалення; РО – регулятор температури опалюваних приміщень; РТ – регулятор температури гарячої води; ЗК – зворотний клапан; О – опалювальний прилад; К – кран гарячого водорозбору

Рисунок 1.2 – Використання змішувальних теплообмінників у системах опалення і гарячого водопостачання

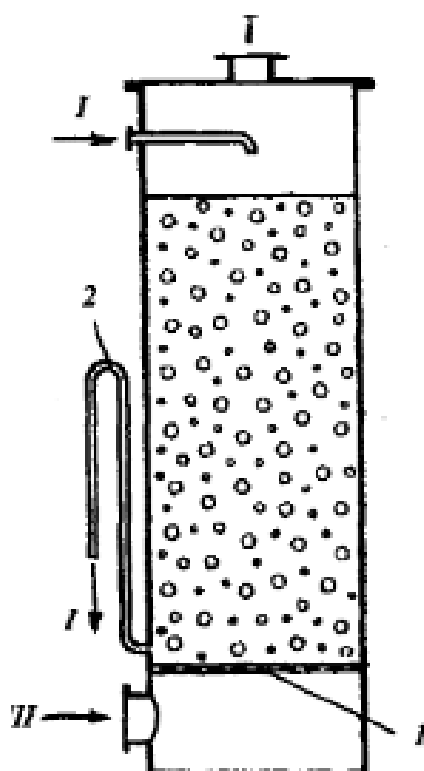
Широке поширення отримали барботажні контактні теплообмінники типу газ-рідина, пара-рідина, рідина-рідина.

Принцип роботи барботажних підігрівачів і випарників полягає в тому, що перегрітий пар або гарячі гази, що заходять в занурені барботери, диспергують в бульбашки, які при спливанні віддають теплоту рідини і одночасно насичуються водяною парою. Чим більше бульбашок утворюється в розчині, тим краще структура барботажного шару і тим більша міжфазна поверхня. Структура барботажного шару залежить від розміру бульбашок і режиму їх руху. На рисунку 1.4 зображено теплообмінний апарат барботажного типу.



1 - осьовий вентилятор; 2 - сепаратор; 3 - горизонтальний колектор з форсунками; 4 - трубопровід подавання водопровідної води через шаровий клапан; 5 - перелив і злив води; 6 - водяний фільтр; 7 - циркуляційний насос; 8 - споживач холодної води

Рис. 1.3 - Змішувальний теплообмінник - вентиляторна градирня



I - рідина; II - газ; 1 - плита; 2 - утка для відведення рідини;

Рисунок 1.4 – Теплообмінний апарат барботажного типу

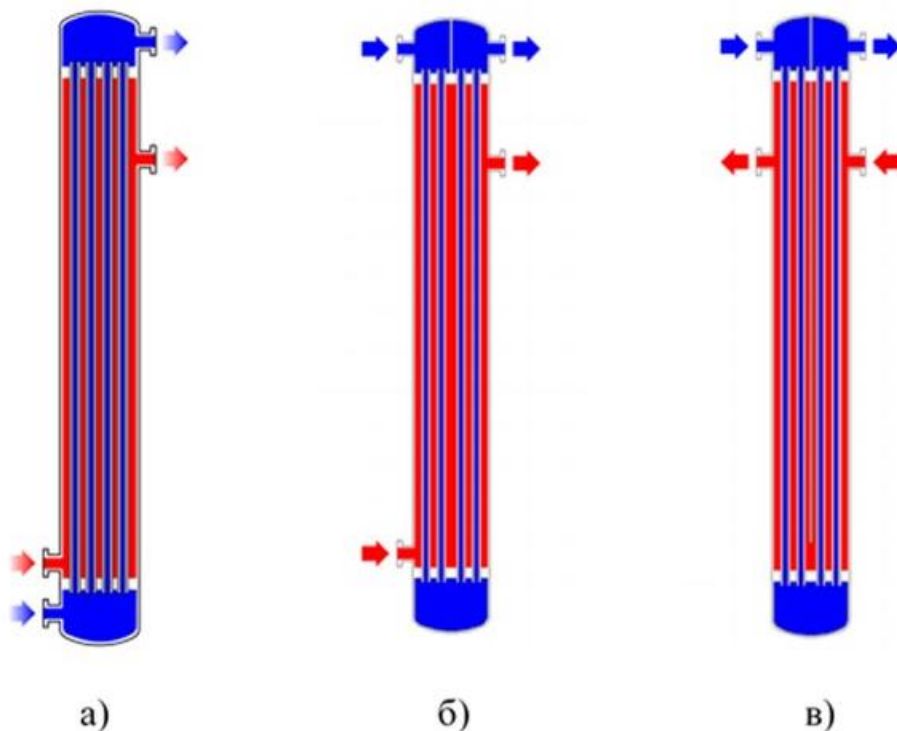
В апаратах барботажного типу практично здійснюється режим, близький до режиму повного перемішування, однак внаслідок поздовжнього і поперечного перемішування рушійна сила процесу в них зменшується, а температури теплоносіїв на виході з апарату практично рівні. Для зменшення поздовжнього перемішування здійснюють секціонування барботажних апаратів за допомогою проміжних решіток.

Перевагами контактних апаратів барботажного типу є: простота в експлуатації; висока продуктивність, теплообмін відбувається з великою швидкістю, тому що нагрівання води відбувається в тонкому шарі.

Використання того чи іншого типу теплообмінника в кожному конкретному випадку повинно бути обґрунтоване техніко-економічними розрахунками, оскільки кожний з них має свої переваги і недоліки.

В залежності від взаємного напрямлення потоку середовищ розрізняють три основні схеми руху рідин і газів в теплообмінниках, які показані на рисунку 1.5 [4]:

- прямоточні – якщо обидві рідини рухаються паралельно в одному напрямі;
- протиточні – якщо обидві рідини рухаються паралельно, але в протилежних напрямках;
- перехресного потоку – якщо одна рідина рухається в напрямі, перпендикулярному напрямі руху другої рідини.



а) прямоточний потік; б) протиточний потік; в) перехресний потік

Рисунок 1.5 – Схеми руху рідини в теплообмінних апаратах

Крім вказаних схем, існують більш складніші схеми, що є різними комбінаціями розглянутих основних схем.

Як теплоносіїв найбільш широко застосовується насичена чи злегка перегріта водяна пара. У змішувальних апаратах, пар, як правило, барботує у рідину (впускають під рівень рідини), при цьому конденсат пари змішується з продуктом, що не завжди припустимо. У поверхневих апаратах пар конденсується на поверхні нагрівання і конденсат віддаляється окремо від продукту за допомогою водовідвідників. Водяна пара, як теплоносіїв, має безліч переваг: легкість транспортування по трубах, регулювання температури, високою інтенсивністю тепловіддачі та ін. Застосування пари особливо вигідно при використанні, коли з продукту вода направляється у вигляді пари, що гріє інші випарні апарати і підігрівники.

Обігрів гарячою водою і рідинами також має широке застосування і вигідне при вторинному використанні. Тепло конденсатів і рідини, що по ходу технологічного процесу нагріваються до високої температури. У порівнянні з паром, рідинний підігрів менш інтенсивний. Однак регулювання процесу і транспорт рідини так само зручний, як і при паровому обігріві.

Загальним недоліком парового і водяного обігріву є швидкий ріст тиску з підвищенням температури. В умовах технологічної апаратури харчових виробництв при паровому і водяному обігріві найвищі температури обмежені 150-160°C, що відповідає тиску 0,5-0,7 МПа [4].

В окремих випадках (у консервній промисловості) застосовується масляний обігрів, що дозволяє при атмосферному тиску досягти температур до 200 С у печах, сушильних установках. Газовий обігрів має велику кількість недоліків: труднощі регулювання і транспортування теплоносія, малою інтенсивністю теплообміну, забрудненням поверхні апаратури (при використанні топкових газів) і ін. Однак у ряді випадків він є єдино можливим (наприклад, у повітряних сушарках) [4].

У холодильній техніці використовуються ряд холодоагентів: повітря, вода, розсоли, аміак, вуглекислота, фреон та ін.

При будь-якому використанні теплоносіїв і холодоагентів, теплові і масообмінні процеси підлеглі в основному технологічному процесу виробництва, заради якого створюється теплообмінні апарати й установки. Тому рішення задач оптимізації теплообміну підлеглі умовам раціонального технологічного процесу.

### **1.3 Прямі контактні теплообмінники**

Прямий контактний теплообмінник передає тепло між двома відносно незмішуваними потоками середовища, які знаходяться в прямому фізичному контакті один з одним. Оскільки немає бар'єру або стінки, що розділяє середовища, загальний ефект полягає в тому, щоб

збільшити ефективність теплопередачі в порівнянні з тією, яку можна отримати за допомогою звичайного устаткування для теплопередачі.

Системи прямого контакту з теплообміном економить енергію, витрати і простір.

Прямий контактний теплообмінник має потенціал:

- 1) в значній мірі усунути проблеми забруднення і корозії,
- 2) забезпечити теплообмін при дуже високих температурах;
- 3) помітно поліпшити продуктивність в низькотемпературних режимах.

З цих причин знайшов реальне і потенційне застосування в областях, де звичайні теплообмінники не практичні.

Відсутність роздільної стінки значно зменшує забруднення і корозію. Економія матеріалу в порівнянні з аналогічним звичайним теплообмінником також досягається. Відсутність матеріальної стінки також знижує обмеження на високотемпературний теплообмін. Покращені характеристики при низьких температурах досягаються завдяки можливості досягнення великих областей теплопередачі за рахунок тонкого диспергування одного середовища в інше. Крім того, опір теплопередачі між двома середовищами набагато менше, тому що немає проміжної стінки. Для багатьох застосувань ці характеристики дозволяють теплообміннику з прямим контактом бути менше, ніж звичайний теплообмінник з еквівалентним навантаженням.

### 1.3.1 Області застосування прямих контактних теплообмінників

Технологія прямого контакту теплообміну особливо підходить для чотирьох широких областей застосування. Перші два напрямки - рекуперація тепла промислових відходів і зберігання тепла - пов'язані з технологіями енергозбереження та утилізації; останні дві області, сонячна і геотермальна, пов'язані з технологіями енергопостачання. Технологія прямого контакту з теплообміном також має різні специфічні сфери застосування, де прямий контакт має унікальні переваги.

Промислова рекуперація відпрацьованого тепла є дуже широкою областю, в якій технологія прямого теплообміну часто може бути корисна. Багато енергоємних галузей відкидають велику кількість відпрацьованого тепла в навколишнє середовище. Температура цих відпрацьованих теплових потоків варіюється від понад 400°C, наприклад, при виплавці металу, до менш 40°C в процесах сушіння. Ці потоки відходів також часто забруднюються і викликають корозію через різні компоненти відходів. Завдяки своїм унікальним перевагам теплообмінники з прямим контактом можуть забезпечити рекуперацію тепла в ситуаціях, коли звичайні рекуператори не будуть технічно або економічно доцільними. Відпрацьоване тепло, отримане таким чином, може бути використано для вироблення електроенергії, для попереднього нагріву технологічних потоків, а також для забезпечення опалення приміщення або води і т.д [5].

Для рекуперації тепла промислових відходів в даний час є рекуперація низькотемпературного тепла з низькотемпературних промислових димових газів (в діапазоні температур від  $20^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ) для нагріву води до  $120^{\circ}\text{C}$ . Низькотемпературний процес прямого контакту заснований на нагріванні водного середовища гарячим димовим газом на вході. Максимальна температура, до якої можна нагрівати воду, визначається температурою і відносною вологістю димового газу, що входить [5].

Інші можливі області застосування прямих контактних теплообмінників зосереджені на визначенні відповідних середовищ для відновлення більш високих температур тепла з високотемпературних димових газів. Наприклад, температурний діапазон від  $90^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$  був проаналізований, і розплавлена сіль була ідентифікована як одна з можливих середовищ. Деяка увага була приділена використанню органічних теплоносіїв для регенерації відпрацьованого тепла в цьому діапазоні температур. Проте, деградація органічних середовищ і викиди через перенесення все ще є суттєвою проблемою в цьому застосуванні технології.

Теплове накопичення - це концепція використання енергії, яка придбала важливість з появою циклічних схем виробництва енергії, таких як централізоване виробництво сонячної енергії та активне сонячне опалення. Теплове зберігання також можна використовувати для компенсації змін попиту, викликаних піками споживання енергії, без необхідності збільшення генеруючої потужності. Основною перевагою системи прямого контакту в цьому випадку є підвищена теплова ефективність, що отримується за рахунок усунення проміжної стінки. Високі коефіцієнти теплопередачі, поряд з досяжними великими областями теплопередачі, забезпечують швидку зарядку / розрядку пристрої акумулювання тепла.

Застосування теплообмінників з прямим контактом у процесах виробництва сонячної енергії сфокусовано на двох конкретних системах: центральні сонячні приймачі та сонячні градієнти солоного градієнта. Деякі конструкції центрального приймача для вироблення енергії в циклі Брайтона або для подачі високотемпературного технологічного газу вимагають охолодження приймача при підвищених температурах. Це досягається використанням відповідної рідини для охолоджуючої рідини, зазвичай рідкого металу або розплавленої солі. Передача тепла робочому газу при таких високих температурах (від  $20$  до  $400^{\circ}\text{C}$ ) буде важче з використанням звичайного теплообмінника. Ідея використання прямого контактного теплообмінника була задумана так, що розсіяні краплі нагрітого теплоносія обмінюються теплом з протитечією робочого газу, що усуває будь-які проблеми. У сонячному ставку з градієнтом солі сонячна енергія, що поглинається, нагріває сильно солону воду в нижній частині ставка. Нагрітий розсіл (зазвичай при температурі від  $60$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ) використовується для випаровування відповідної робочої рідини для вироблення енергії в звичайному циклі Ренкіна. Переваги

теплообмінника з прямим контактом в цьому застосуванні обумовлені його чудовими низькотемпературними характеристиками і здатністю приймати агресивний розсіл [5].

Багато спеціалізованих застосувань для теплообмінників з прямим контактом також існують через їх унікальні характеристики. Ці області застосування варіюються від забезпечення теплообміну в космічних енергетичних системах до охолодження оболонок термоядерних реакторів.

### 1.3.2 Переваги прямих контактних теплообмінників

Теплообмінники з прямим контактом мають важливі переваги в порівнянні зі звичайними теплообмінниками завдяки тісному контакту із середовищем; з тієї ж причини вони мають недоліки, які обмежують їх застосування. У будь-якій працездатній концепції теплообміну з прямим контактом повинні дотримуватися трьох фундаментальних критеріїв:

- 1) незмішуваності двох середовищ - без значного масового переносу;
- 2) хімічна стабільність - немає значного хімічної взаємодії між двома середовищами;
- 3) достатня різниця в щільності між середовищами.

Ці три вимоги накладають значні обмеження на комбінації носіїв, які можна використовувати. Ці обмеження особливо серйозні в високотемпературних і корозійних середовищах, де прискорюються масоперенос і хімічні процеси. Іншим наслідком прямого контакту із середовищем є те, що передача тепла повинна відбуватися при тиску в системі; теплообмін між рідинами при різному тиску неможливий. Крім того, оскільки між середовищами існує як гідродинамічна, так і теплове взаємодія, щільність пропускних можливостей повинна бути обмежена значеннями нижче тих, які викликають значне захоплення одного потоку середовища в інший. Недостатня різниця в щільності середовища може серйозно обмежити ці досяжні пропускні можливості.

### 1.3.3 Класифікація прямих контактних теплообмінників за середовищами, що в них змішуються

Розглядаються наступні типи прямих контактних теплообмінників: рідина / рідина, рідина / тверда речовина, рідина / газ, газ / рідина і газ / тверда речовина. Різні типи апаратів додатково класифікуються по різних областях застосування, в яких вони знаходяться. Визначено чотири основних сфери застосування: рекуперація тепла промислових відходів, накопичення тепла, витяг геотермальної енергії і витяг сонячної енергії.

### 1.3.3.1 Рідина/рідина

Теплообмінники рідина-рідина прямого контакту включають ті, які застосовуються для рекуперації тепла промислових відходів, геотермальних, сонячних та інших (спеціалізованих) систем. В цьому випадку спеціалізованим застосуванням є виробництво прісної води шляхом опріснення, щоб отримати чисту воду.

Використання теплообмінників даного типу для утилізації відпрацьованого тепла не таке широке, як використання апаратів типу: газ/рідина або газ/тверда речовина. Це пов'язано з тим, що більшість потоків корисного тепла з вмістом відпрацьованого тепла перебувають в газоподібному, а не рідкому стані. Однак одна система, розроблена Hitachi Limited з Японії, використовує проміжний масляний контур для передачі тепла від потоку вихлопних газів до органічної робочої рідини.

### 1.3.3.2 Рідина/тверда речовина

Використання апаратів типу рідина/тверда речовина є обмеженим однією областю застосування: зберігання тепла. Акумуляування тепла набуває все більшого значення з підвищеним акцентом на енергозбереження і з появою циклічних систем виробництва енергії, таких як сонячна енергія і системи опалення. У всіх розглянутих системах теплоносій передає тепло речовині, яка спочатку є твердою. Всі системи надають перевагу прихованій теплоті плавлення носія для досягнення великих об'ємних потужностей накопичення енергії. Оскільки накопичення тепла досягається шляхом зміни фази, передача тепла відбувається при відносно постійній температурі. Тому накопичення енергії при бажаній температурі може бути досягнуто шляхом правильного вибору середовища зберігання.

### 1.3.3.3 Газ/рідина

У теплообмінниках типу газ/рідина теплообмін відбувається між газом і рідким середовищем. Термін «газ/рідина» вказує на те, що рідина займає більшу частину обсягу, в той час як газ диспергується в рідкому середовищі. Кілька областей застосування були визначені в цій класифікації.

Ці області застосування включають: 1) утилізацію тепла промислових відходів, 2) зберігання тепла, 3) сонячну енергію і 4) інші системи.

Занурювальне спалювання для нагріву води є однією з областей, в якій застосовується технологія прямого контакту газ/рідина. У загальній конструкції вихлопні гази пальника направляються на дно резервуара, заповненого водою. Гази розподіляються через впускний колектор; це призводить до створення гарячих бульбашок газу, які піднімаються через посудину. Таким чином, тепло передається безпосередньо від газу до рідкого середовища.



У загальному, найбільше системи газ/рідина застосовуються для рекуперації відпрацьованого тепла з промислових вихлопних газів. У своєму найбільш загальному варіанті вода виступає в якості другого середовища, в яку тепло передається від гарячих вихлопних газів за схемою прямого контакту. Звичайне теплообмінне обладнання не може часто використовуватися для ефективного вилучення тепла з забруднюючих і агресивних вихлопних газів. У звичайному обладнанні, якщо температура потоку на боці газу знижується нижче точки роси кислоти, конденсація кислот, що містяться в вихлопних газах, може викликати знос теплообмінника. Щоб запобігти корозії, димові гази часто можуть охолоджуватися тільки до температури приблизно від 50 до 60 °C .

Теплообмінники з прямим контактом можуть використовуватися там, де звичайні теплообмінники недоцільні або небажані. Оскільки вимоги до матеріалів менше, пристрої прямого контакту можуть бути виготовлені з дорогих, стійких до корозії матеріалів. Таким чином, з вихлопних газів може бути вилучено приховане тепло від конденсації, а також температура вихлопних газів може бути доведена в межах від 5 до 10 °C від температури води, що поступає; в деяких випадках температура газу може становити від 15 до 20 °C. Системи прямого контакту цього типу часто називають системами «регенерації тепла конденсації», тому що вони можуть використовуватися для відновлення прихованої теплоти (хоча і при більш низькій температурі) і, таким чином, значно збільшують загальну придатну для регенерації енергію. Головною метою таких систем є рекуперація тепла [5].

Використання води в якості робочої рідини в процесі прямого теплообміну призводить до обмеження температури в діапазоні від 25° до 35° C. Процес можна описати таким чином: димові гази надходять в нижню частину колони і потрапляють в те, що відповідним чином позначено як зона зволоження. Вода, що пройшла через колону, випаровується, і димові гази охолоджуються; велика частина тепла в цій точці випаровується, а не нагріває воду. Коли димові гази досягають насичення і рухаються далі вгору по вежі, водяна пара починає конденсуватися і нагрівати зустрічну воду. Конденсація триває до тих пір, поки димові гази, що виходять з колони, не містять менше води, ніж димові гази, що надходять в колону. Температура адіабатичного насичення представляє собою максимальну температуру, до якої рідина може бути нагріта. Ця температура визначається температурою на вході і вологістю димових газів.

#### 1.3.3.4 Газ/тверда речовина

Апарати типу газ/тверда речовина знайшли значне застосування в утилізації тепла промислових відходів. Більшість концепцій газ/тверда речовина для утилізації відпрацьованого тепла є протиточні пристрої, аналогічні теплообмінникам газ/рідина. Однак в одному пристрої використовується рухомий псевдозріджений шар, який рухається перпендикулярно потоку газу.

Ці теплообмінники можуть бути використані для попереднього нагріву технологічних матеріалів, рекуперації тепла з твердих речовин в процесах прожарювання або навіть для теплообміну між газами, коли тверді речовини виступають в якості проміжного теплоносія.

Теплове сховище - це ще одна область, де застосовуються системи газ/тверда речовина. Як і у випадку з концепціями акумулювання тепла рідина/ тверда речовина, енергія накопичується шляхом акумулювання тепла. У цьому випадку теплоносієм є газ, а не рідина. Потік газу може бути потоком тепла промислових відходів або робочої рідиною сонячного циклу Брайтона.

Підводячи підсумок, можна сказати, що технологія прямого контакту з теплопередачею має великі перспективи для багатьох областей застосування в енергетиці. З усіх областей застосування промислове виробництво і переробка є одним з найбільш значних потенційних бенефіціарів такої технології.

#### **1.4 Апарати та пристрої з безпосереднім контактом газового і рідкого середовищ**

Одним з шляхів інтенсифікації теплообмінних процесів у різних апаратах енергетики і теплотехнологій є використання апаратів та пристроїв, в яких процеси тепломасообміну в газорідинних системах приводять до умов безпосереднього контакту газового і рідинного середовищ. Останнім часом такі апарати та пристрої широко використовуються в якості контактних випарників різних розчинів і водопідігрівачів, контактних утилізаторів теплоти відхідних газів і парогазових сумішей, плівкових охолоджувачів води (градирні), плівкових охолоджувачів і осушувачів повітря (кондиціонери) та ін.

##### **1.4.1 Контактні випарники**

Випарники є робочими установками для зневоднення, концентрації і процесів кристалізації в різних галузях промисловості. Якщо щільність або консистенція продукту є важливим фактором якості, то контроль рівня процесу буде набагато складнішим. Наприклад, заводи з переробки томатів використовують випарники для виробництва томатної пасты. Щільність томатної пасты є найбільш важливою змінною якості, яку необхідно контролювати в невеликому діапазоні. Змінними, якими можна маніпулювати, є приплив і відтік, які одночасно впливають як на щільність, так і на рівень рідини. У випарнику відбуваються багатопотокові процеси, тому він має декілька виходів.

Випарники є головними у будь-якому процесі опріснення. Крім цього, вони є важливими і використовуються у деяких промислових виробництвах, які включають хімічні, нафтові та харчові процеси. Конфігурація випарника заснована на створенні гарячої поверхні, де гріючий

пар конденсується на одній стороні, а пара утворюється на іншій стороні. Випарники бувають двох типів: із трубою, що занурюється та з плівкою, що стікає(падає).

Особливості занурюючого випарника (рисунок 1.6) включають в себе наступне:

- ця конструкція використовується в якості ребойлера для чайного котла. Одним з найбільш поширених застосувань є побутовий зволожувач повітря і електричний чайник. Занурюючий випарник був найбільш поширеною конструкцією в першій половині двадцятого століття і використовувався в різних областях застосування, включаючи опріснення.

- система занурюючого випарника підходить, якщо немає небезпеки утворення накипу або забруднення.

- якщо система схильна до масштабування або забруднення, наприклад, при опрісненні, необхідно використовувати регулювання робочих умов для контролю швидкості масштабування.

- коефіцієнт теплопередачі для занурюючого випарника набагато нижче, ніж для більш поширеної конструкції падаючої плівки. Це пов'язано з тим, що гідростатична головка, що накладається на поверхню трубки, перешкоджає утворенню, зростанню і виділенню бульбашок пари на гарячій поверхні.

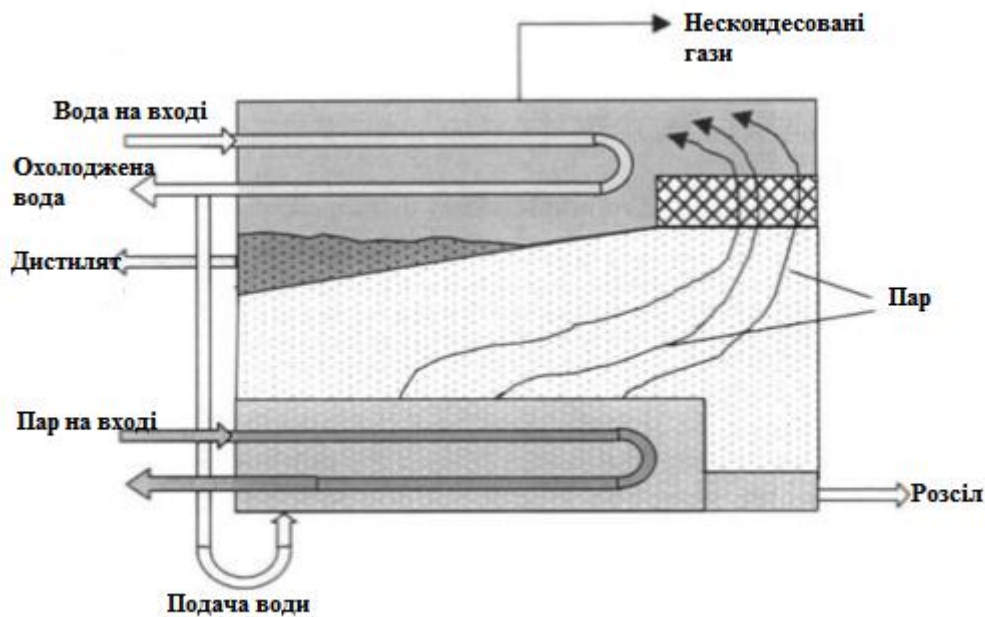


Рисунок 1.6 – Випарник зануреного типу

Особливості випарника конфігурації падаючої плівки вертикальної трубки (рисунок 1.7 ) включають в себе наступне:

- нагрівальний пар тече всередині трубок, а рідина розпилюється на зовнішній поверхні трубок.

- рідкий спрей утворює тонку падаючу плівку на зовнішній поверхні пучків труб. В результаті утворення і зростання бульбашки пари зустрічають менший опір, ніж в конфігурації з зануреними трубами.

- трубки розташовані в декілька рядів з квадратним кроком, щоб спростити процес очищення.

- основною перевагою конфігурації горизонтальної труби є повне змочування площі поверхні труби. Це досягається шляхом правильного вибору кроку трубки, діаметра трубки, форми розпилення і витрати рідини. Деталі процесу випаровування всередині системи досить складні, тому що він включає в себе одночасне випаровування і конденсацію. Це викликано тим, що висхідний пар контактує з ненасиченими краплями води. Відповідно, частина пара віддає свою приховану теплоту краплі рідини, викликаючи підвищення її температури до умов насичення. Згодом краплі насиченої води випаровуються, коли вони падають на гарячу поверхню трубок.

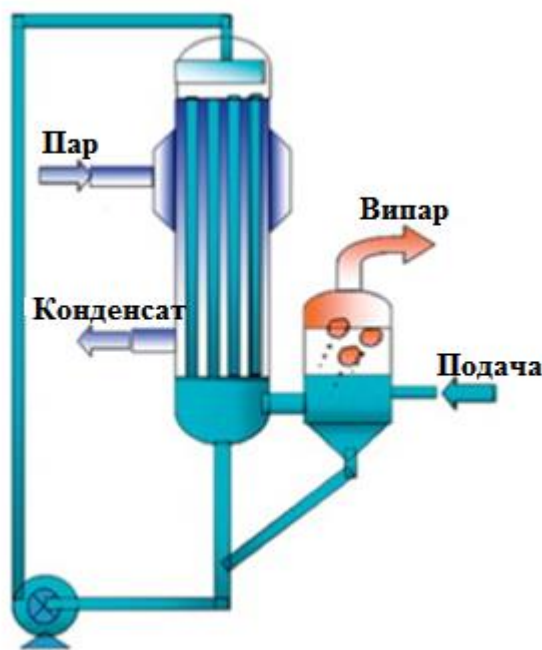


Рисунок 1.7 – Випарник конфігурації падаючої плівки у вертикальній трубі

Випарники з прямим контактом - це пристрої, в яких рідка фаза випаровується при закачуванні перегрітого газу. Перегрітий газ впорскується в рідину, проходить через підводні отвори розподільної системи. Газ утворює бульбашки, які ростуть в отворах до досягнення критичного обсягу, після чого вони відриваються. Після стадії утворення бульбашки піднімаються в стовпі рідини. Потім пара видаляється з системи бульбашками, які досягають верху стовпа рідини. Недоліки включають в себе високі витрати енергії і відносно низьку ефективність видалення.

Схема випарника з прямим контактом, показана на рисунку 1.8 . Він складається з посудини з газорозподільною системою, розташованою близько до його дна. Газоподібні продукти згоряння, які подаються в систему розподілу, проходять через центральну трубу, яка виходить з верхньої частини випарника. Отже, система подачі газу складається з центральної труби і розподільної системи. На рисунку 1.8 також показані символи для температур, масових часток, масових витрат і швидкостей теплопередачі, необхідних для моделювання цього типу випарника прямого контакту. Для цього типу випарника загальна модель виходить шляхом поєднання моделі рідкої фази, моделі подачі газу і моделі перегрітої бульбашки.

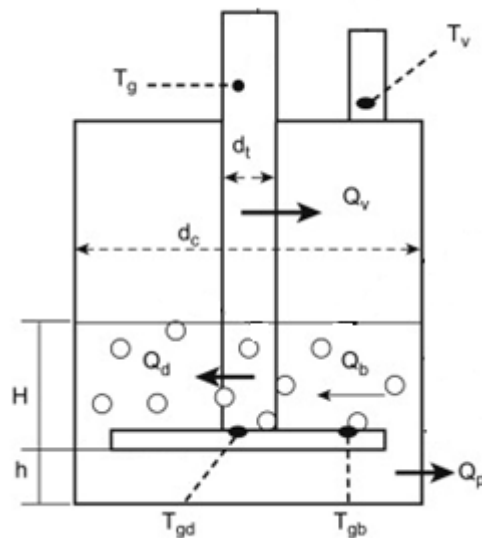


Рисунок 1.8 – Прямий контактний випарник

#### 1.4.2 Теплоутилізаційні установки

Теплоутилізаційні установки, призначені для сприйняття теплової енергії з теплових викидів, можна розділити на два види: теплові насоси, що забезпечують збільшення потенціалу робочої речовини, і теплоутилізатори - теплообмінники безпосередньої дії. Теплоутилізатори-теплообмінники можуть використовуватися тільки в тому випадку, якщо потенціал теплових викидів вище потенціалу того середовища, якій передається тепла енергія. Існують різні класифікації теплоутилізаторів-теплообмінників.

Значним недоліком великої групи теплоутилізаційних установок є те, що в них виробляється пар низьких параметрів, що використовується в основному для потреб тепlopостачання. У літній період, коли теплофікаційні навантаження значно скорочуються, такий пар не знаходить застосування. При цьому утилізаційний пар викидається в атмосферу або утилізаційна установка відключається.

Утилізатор тепла газів, що йдуть, є теплообмінником, який утилізує димові гази, що виробляються паровими котлами, і теплоту, вироблювану установками, що спалюють паливо. Головне призначення утилізатора тепла димових газів - повернення виробленого тепла в цикл котельної або забезпечення побічного користувача тепловою енергією. При використанні пристроїв нарощується ефективність діяльності об'єктів разом з тепловими схемами. Різниця може досягати 20%, що веде до зниження паливної витрати на 10%.

#### 1.4.3 Плівкові охолоджувачі води

Градирні - це випарні пристрої відведення тепла, які відводять відпрацьоване тепло з процесу в атмосферу за допомогою охолодження води навколишнім повітрям. Градирня в основному представляє собою змішаний теплообмінник. Зона розпилення, зона заповнення і зона дощу є трьома важливими зонами з точки зору тепломасопереносу в градирні.

До плівкових охолоджувачів води можна віднести градирні плівкового типу.

Плівкові градирні мають ряд переваг перед іншими типами. По-перше, наявність тонкого шару води дозволяє застосовувати високі швидкості повітря без виносу крапель і, таким чином, створювати інтенсивний теплообмін. По-друге, здійснюючи прямолінійний проходження повітря протитечією по відношенню до рухається воді, можна отримати інтенсивний теплообмін при порівняно малих опорах. У цьому випадку опір - повітря обумовлено головним чином втратами при вході і виході з насадки, а також опорами тертя при проході плівковою насадкою.

Плівкові градирні досить компактні і дозволяють підвищувати щільність зрошення в 2 - 3 рази в порівнянні з крапельними при однаковому ефекті охолодження. Теорія їх теплового розрахунку більш ясна, ніж крапельних градирень.

### 1.5 Тепломасообмін у контактних апаратах

Багато питань підвищення ефективності енергетичних і теплоізолюючих установок різного призначення пов'язані з тепло- і масообміном між рідиною і газом в цих установках або в контактних апаратах їх технічних систем.

Утилізація теплової енергії відхідних газів котельних, дизельних і газотурбінних установок, регенерація теплової енергії останніх, отримання нагрітої води в контактних водонагрівачах, випарне охолодження і гігроскопічна опріснення води - ось далеко не повна область застосування контактних апаратів. Це пояснюється: по-перше, простотою їх конструкції і незначною металоємністю в порівнянні з рекуперативними поверхневими теплообмінниками, можливістю виготовлення з неметалічних матеріалів; по-друге, - підвищенням ефективності установок за рахунок більш повного використання теплової енергії, можливості поліпшення

параметрів термодинамічної циклу, регулювання витрати робочого тіла, внутрішнього охолодження або нагрівання установки; по-третє, - можливістю створення нових установок і їх нових технічних систем, що забезпечують скорочення витрати палива, води, матеріалів, збільшення потужності і продуктивності, поліпшення умов праці і зменшують забруднення навколишнього середовища. Далеко не повністю ще розкриті можливості використання процесів тепло- і масообміну в контактних апаратах енергетичних і тепловикористовуючих установок. Цьому сприяє існуючий чисто емпіричний підхід до розрахунку, який дозволяє виявити внутрішній зв'язок фізичних явищ в складних процесах тепло- і масообміну.

Практично єдина теорія розрахунку процесів в контактних апаратах для систем «газ - рідина» відсутня. Це ускладнює розробку, проведення досліджень, випробувань контактних апаратів, технічних установок і систем, оптимізацію по режимним і конструктивним параметрам, вибір способу і організацію автоматичного регулювання, викликає необхідність додаткових витрат і обсягів робіт. Таким чином, узагальнюючі теоретичні розробки в області тепло- і масообміну є актуальними, тому що дозволяють більш правильно, на основі фізичних уявлень, і з меншими витратами вирішувати поставлені завдання.

Методи розрахунку тепло- і масообміну в контактних апаратах, як правило, засновані на використанні коефіцієнтів переносу, віднесених до площі поверхні контакту і обсягом реактивного простору, коефіцієнтів ефективності і корисної дії, безрозмірних комплексів, що включають твір коефіцієнтів переносу на площу поверхні контакту. Кожна група методів характеризується своїми особливостями, але всі вони засновані на емпіричних, в тому числі критеріальних рівняннях. При цьому числа подібності отримані із загальних рівнянь руху, теплопровідності і дифузії, виведених для нескінченно малого обсягу середовища, що відбивають елементарний акт перенесення, але не враховують належною мірою тепло- і масообміну в апараті в цілому.

Група методів розрахунку - з використанням добутку коефіцієнтів переносу на площу поверхні контакту - відрізняється тим, що дозволяє оперувати коефіцієнтами переносу і поверхнею контакту, не вдаючись до безпосереднього визначення їх чисельних значень, що дає можливість більш широкого узагальнення розрахункових залежностей. Цей принцип описаний в розробках Андрєєва Є.І.[6]. В основі яких лежать диференціальні рівняння інтенсивності тепло- і масообміну і їх рішення дозволяють описати процес мінімумом узагальнених змінних, одним-двома визначальними числами подібності, а також дають можливість отримати аналітичну кількісну залежність: рівняння відносної інтенсивності тепло- і масообміну у вигляді рівності відносних рушійних сил цих процесів. У ньому в якості змінних містяться тільки початкові і кінцеві параметри газу і рідини. Воно справедливо для будь-яких апаратів, процесів і умов їх перебігу.

### 1.5.1 Методи розрахунку

Існують два основних напрямки в розробці методів розрахунку процесів тепло- і масообмінних апаратах. Методи одного з них дозволяють визначити сумарну кількість теплоти і маси, передане від одного середовища до іншого в контактному апараті, кінцеві або початкові параметри середовищ, а також витрати середовищ. Методи іншого напрямку дозволяють визначити локальні показники процесу і характеристики середовищ в апараті: діаметри крапель, їх масу, швидкість, температуру, тиск і ін. Ці методи засновані на вирішенні інтегродиференціальних рівнянь балансу теплоти і маси і використанні емпіричних формул для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масопереносу [6] .

Для інженерного розрахунку контактних апаратів, як правило, застосовують методи розрахунку тепло- і масобміну, представлені першим напрямком. Воно характеризується різноманіттям методів розрахунку контактних апаратів, певною мірою відображає складність гідродинамічної і теплофізичної обстановки в їх реактивних просторах і, особливо, відмінність способів освіти міжфазної поверхні, її структури, а також її неоднорідність і полідисперсність.

Всі розрахункові методи, що мають відношення до контактних апаратів, можуть бути розбиті на чотири групи [6] .

1. Методи використовують значення коефіцієнтів переносу (коефіцієнти явного теплообміну  $\alpha$ , повного теплообміну  $\sigma$  і масообміну  $\beta$ ), віднесених до площі поверхні контакту  $F$  і визначаються або безпосередньо в розмірному вигляді, або в складі безрозмірних комплексів.
2. Методи, які використовують чисельні значення безрозмірних комплексів, що включають в якості єдиної змінної похідної  $\alpha F$ ,  $\sigma F$ ,  $\beta F$ .
3. Методи, які використовують різного виду коефіцієнти ефективності або корисної дії.
4. Методи використовують в якості визначаються розмірні або безрозмірні величини, які не містять коефіцієнтів переносу  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\sigma$  та являють собою відносини температур, ентальпій або об'ємні показники процесу тепломасообміну.

Розрахункові методи першої групи найчастіше використовують стосовно до апаратів з зрошуваною насадкою, з огляду на те що при дослідженні цих апаратів вдається з достатнім ступенем точності оцінювати площу поверхні контакту між газом і рідиною

В апаратах з крапельної, пінної міжфазною поверхнею і в барботажних, як правило, не вдається з достатньою точністю оцінити площу поверхні тепло- і масобміну, тому в якості розрахункових використовують методи другої, третьої і четвертої груп, що виключають оперування чисельним значенням площі поверхні контакту.



### 1.5.2 Алгоритм розрахунку

Інженерний метод розрахунку заснований на використанні двох основних залежностей:

- критеріального рівняння тепломасообміну [6]

$$Km = f(Re; Bm); \quad (1.1)$$

де  $Bm$  – критерій теплових еквівалентів;

$Re$  – число Рейнольдса;

- аналітичного рівняння відносної інтенсивності тепло- і масообміну [6]

$$\Delta_t = \Delta_d; \quad (1.2)$$

де  $\Delta_t$  – коефіцієнт інтенсивності тепломасообміну;

$\Delta_d$  – коефіцієнт концентрації газу.

За допомогою критеріального рівняння тепломасообміну проводиться розрахунок повного теплообміну. За допомогою аналітичного рівняння відносної інтенсивності тепло- і масообміну проводиться розрахунок масообміну в контактних апаратах. Порядок обсягу розрахунку залежить від постановки завдання.

## 1.6 Висновки та постановка задач

Після опрацювання літературних джерел був проведений аналіз теплообмінних апаратів і зроблені наступні висновки:

1. Контактні теплообмінні апарати менш поширені ніж поверхневі, але мають значні переваги: висока інтенсивність процесів теплообміну, істотне зменшення корозії обладнання, виключення можливості відкладень на поверхнях нагріву, можливість підвищення температурного рівня технологічних процесів, простота конструкції і зниження витрат дефіцитних матеріалів і відповідно матеріальних витрат; відсутність розподільчої поверхні дозволяє використовувати в якості теплоносіїв забруднені і агресивні гази, рідини, висококонцентровані розчини та ін.

2. Контактні апарати широко використовуються в промисловості, та дозволяють використовувати теплоту відхідних газів, що призводить до економії палива та покращення екологічної ситуації навколишнього середовища.

3. Апарати з безпосереднім контактом рідкої і газової фаз компактні, енергоефективні та екологічні.

4. Контактні апарати мають переваги над поверхневими: в інтенсивності теплообміну, компактності, меншому аеродинамічному опорі .

На основі сформованих висновків, визначаємо наступні задачі дослідження:

1. Розробка контактного апарату з ежекційною подачею рідини в робочу зону.
2. Дослідження режимів течії в контактному апараті, визначення характерних умов їх виникнення.
3. Розробка методики дослідження тепломасообміну в контактному апараті з ежекційною подачею рідини в робочу зону.
4. Дослідження газодинаміки контактного апарата в середовищі Solid Works.

## **2 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ТА КОНТАКТНОГО АПАРАТА З ЕЖЕКТОРНОЮ ПОДАЧЕЮ РІДИНИ В РОБОЧУ ЗОНУ**

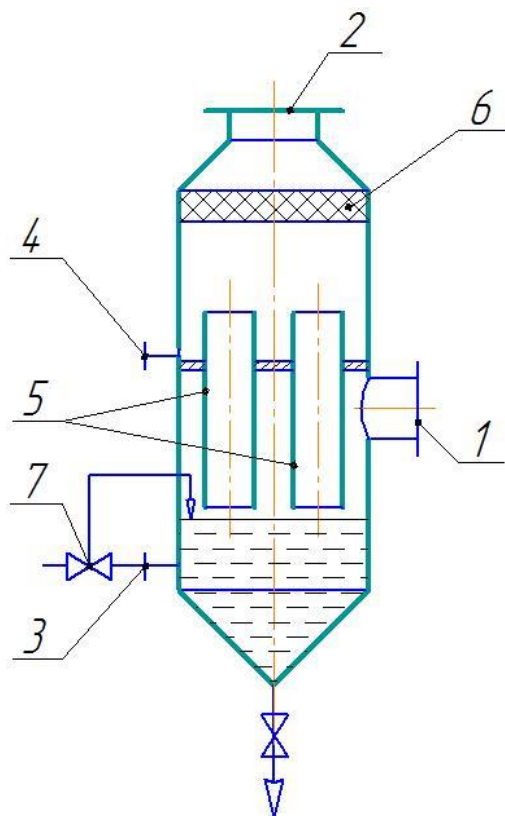
При виборі типу контактного апарату для вирішення конкретного завдання, крім вимоги щодо високої енергетичної ефективності, простоти конструкції і низької матеріаломісткості, важливим параметром є малий гідравлічний опір активної зони контактного апарату. Останній вимозі в більшій мірі відповідають плівкові контактні апарати. Однак, при цьому, слід зазначити наступне: при русі плівки вниз в протivotоті з газом продуктивність апарату обмежена відносно невисокою критичною швидкістю газу, при якій виникає явище «захльобування» (реверс течії рідини) [7-19], що викликає зростання виносу рідини газовим потоком .

Збільшення продуктивності контактних газорідинних апаратів плівкового типу можна досягти в разі реалізації в них супутного руху плівки рідини і потоку газу. Однак, у всіх відомих конструкціях таких апаратів [7, 20] плівковий односпрямований рух вимагає спеціальної організації незалежного підведення фаз в робочий канал і завдання цілком певних витратних характеристик. Так, в разі висхідного односпрямованого руху, витрата газової фази повинна забезпечити його швидкість, при якій вся рідина втягується в висхідний рух. Завдяки значній швидкості газу, при цьому ростуть втрати тиску в контактному апараті, а стійкий супутній рух рідини спостерігається при досить малих витратах рідкої фази [20].

Необхідність вирішення виникаючих проблем істотно ускладнює конструкцію і збільшує матеріалоємність надійного тепломасообмінного апарату, особливо якщо він повинен працювати при змінному тепловому навантаженні.

### **2.1 Опис установки**

Для дослідження контактного газорідинного апарату плівкового типу був створений та запатентований пристрій, зображений на рисунку 2.1. У патенті [21] запропонована конструкція тепломасообмінного апарату з оригінальним рішенням підведення рідкої фази . Над поверхнею рідини з зазором розташовується одна або кілька труб. При проходженні через щілину між нижнім кінцем труби і вільною поверхнею рідини потік газу інжектує (захоплює) за собою в трубу деяку кількість рідини. При цьому витрата рідкої фази, що залучається в процес, при інших рівних умовах, визначається витратою газу.



1 – підвід газу; 2 – відвід газу; 3 – підвід рідини; 4 – відвід рідини; 5 – барботажні труби;  
6 – сепаратор; 7 – регулятор рівня

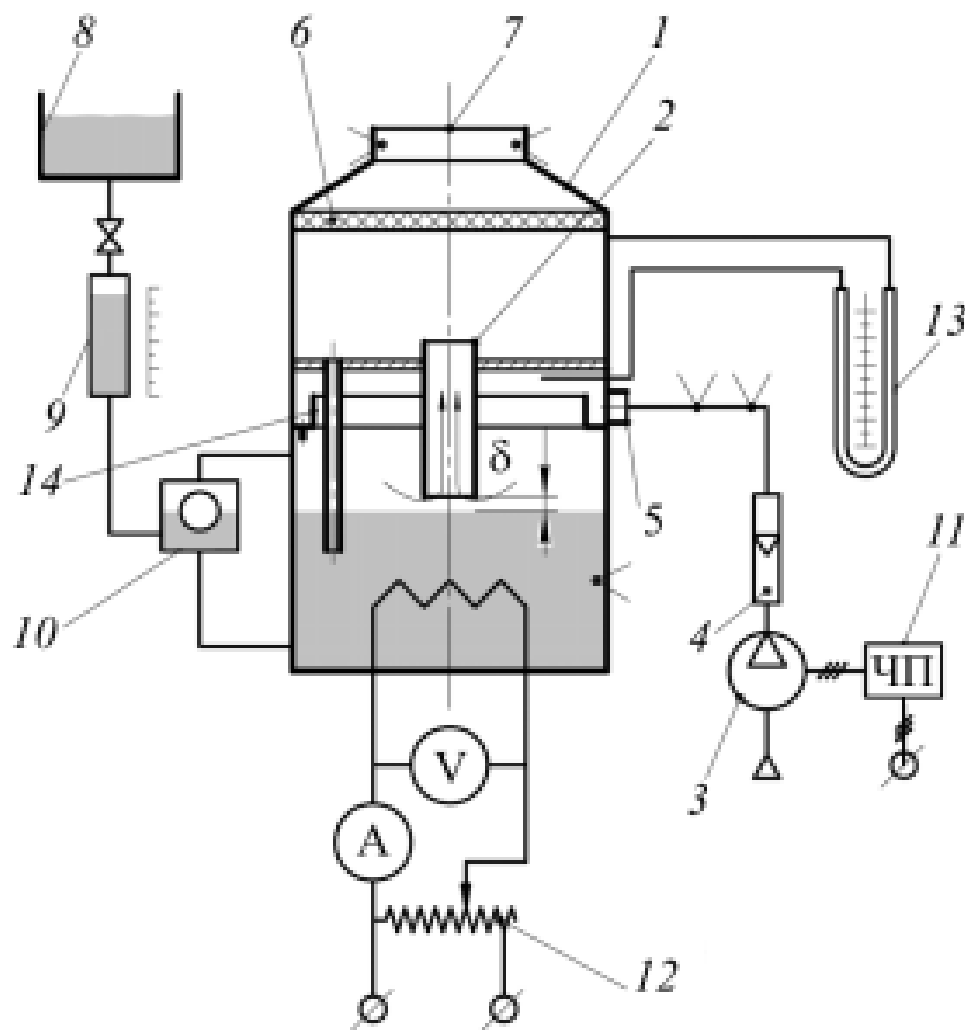
Рисунок 2.1 – Контактний теплообмінник

В роботі вивчаються гідродинамічні режими двофазного потоку в контактному апараті при інжекційному способі підводу рідини в його активну зону.

#### 2.1.1 Експериментальний стенд

Для проведення досліджень була створена установка, принципова схема якої представлена на рисунку 2.2. Установка складається з корпусу 1, в якому розміщена барботажна труба 2. Повітря повітродувки 3 через ротаметр 4, вхідний патрубок 5 подається в нижню камеру і далі через барботажну трубу 2 і сепаратор 6 виходить з апарату через патрубок 7. Вода з ємності 8 порційно подається в мірний циліндр 9 і далі через регулятор рівня 10 в нижню частину корпусу 1. За допомогою регулятора рівня 10 забезпечується сталість заданого зазору  $\delta$  між нижнім обрізом труби 2 і рівнем рідини в корпусі. Повітря, що проходить через зазор  $\delta$ , захоплює воду. Новоутворена при цьому водоповітряна суміш, проходить через барботажну трубу 2 в вихідну камеру корпусу, де розділяється на рідку і газоподібну компоненти. Відсепарована вода по опускній трубі повертається в нижню камеру. Витрата повітря регулюється зміною частоти обертання робочого колеса повітродувки 3 за допомогою частотного перетворювача 11.

Температура води в нижній частині апарату вимірюється хромель-копелевою термопарою і підтримується на заданому рівні за допомогою регулятора 12. Температура повітря по сухому і мокрому термометрах вимірюється на вході в патрубок 5 і на виході з патрубка 7 за допомогою хромель-копелевих термопар. Втрата тиску на теплопередавальному елементі 2 вимірюється мікроманометром 13 типу ММН-2400. Розподільвач повітря 14 забезпечує, симетричне вісі, розподілення швидкості повітря на вході в барботажную трубу 2. Похибка вимірів температури –  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ; втрат тиску –  $\pm 4-6\%$  від зафіксованого значення.



1 – корпус; 2 – барботажна труба; 3 – повітродувка; 4 – ротаметр; 5 – вхідний патрубок; 6 – сепаратор; 7 – вихідний патрубок; 8 – ємність вихідної рідини; 9 – мірний циліндр; 10 – регулятор рівня; 11 – частотний перетворювач; 12 – регулятор температури; 13 – мікроманометр; 14 – розподільвач повітря

Рисунок 2.2 – Принципова схема експериментальної установки

## 2.2 Переваги контактного апарата з ежекторною подачею рідини в робочу зону

В апаратах плівкового типу газ (пар) і рідина стикаються на поверхні поточної рідкої плівки. Перебіг плівки відбувається по вертикальних поверхнях, які представляють собою труби або пластини. Такі апарати можуть працювати при протитечії газу і рідини (газ рухається знизу вгору назустріч стікає по поверхні плівка); вони можуть працювати також при низхідній прямотечії (газ і рідина рухаються зверху вниз) і третій варіант роботи: працюють при висхідній прямотечії (газ і рідина рухаються знизу вгору).

При цьому ефективність протікання робочого процесу в плівкових апаратах і пристроях залежить від рівномірності розподілу рідини по робочій поверхні, тому що при розривах плівки різко знижується продуктивність апарату. У зв'язку з цим важлива увага приділяється вирішенню такого завдання, як створення надійних розподільчих пристроїв, що забезпечують оптимальну щільність зрошення, яка виключає розрив плівки в умовах її нестабільності.

Двофазні системи у вигляді низхідної плівки рідини і газу, що знаходиться в ній, є поширеними методами, що дозволяють проводити різноманітні тепло- і масообмінні процеси, що протікають в багатьох промислових апаратах і пристроях.

Організація робочого процесу може здійснюватися в залежності від способу подачі води і газоподібної фази.

Досліджуваний контактний апарат працює при протитечії газу і рідини та має оригінальне рішення підведення рідкої фази (води): ежекторна подача рідини (води) в робочу зону. Такий метод заснований на принципі Бернуллі, який говорить: «коли швидкість рідини збільшується, тиск у рідині зменшується і навпаки».

### 2.2.1 Принцип дії апарата

Принцип дії контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону в наступному. Газ рухається над рідиною, яка знаходиться на заданому рівні в нижній частині апарату. За рахунок міжфазного тертя на поверхні рідини утворюються хвилі, з яких потік повітря зриває краплі рідини, які засмоктовуються в барботажні труби. В результаті в них утворюється сильно емульговане середовище з надзвичайно розвинутою поверхнею теплообміну між газом та водою. У зв'язку з тим, що питома вага емульсії менше питомої ваги води, що її оточує, а тиск газового потоку більше атмосферного, нагрітий емульгований шар води піднімається вище рівня води, який підтримується в камері. Рух емульгованого шару води вгору з подальшим його переливанням через край контактної камери називається ерліфтным ефектом.

Чим з більшою початковою швидкістю газовий потік входить в воду, тим більше утворюється бульбашок і тим більше міжфазна поверхня, через яку відбувається тепло- та

масообмін між газом та водою. Підйом води в камері реалізується в результаті підвищеного тиску газового потоку в нижній площині емульгованої зони. Велика кількість газових бульбашок діє на воду як поршень. На фото (рисунок 2.3) зображена частина дослідної установки, де видно як рухається потік в середині барботажної труби.

Дослідний апарат має деякі особливості, які полягають в наступному: 1) структура емульгованого шару неоднорідна та різко залежить від гідродинаміки потоків, що утворюють двофазну систему; 2) швидкість руху газових бульбашок (газової фази) та води всередині емульгованого шару знаходиться між собою в певній залежності; 3) температура газів, що відходять з камери знаходиться в прямій залежності від температури води [22].



Рисунок 2.3 -- Фото корпусу дослідної установки

Структура емульгованого шару залежить від діаметру камери та швидкості газу на вході. В роботі виконується візуалізація різних режимів течії та умов їх виникнення.

### 2.2.2 Аналіз подібних апаратів

З швидким технічним прогресом у світі, який торкається і теплоенергетики, використання плівкових контактних апаратів стає більш популярним. Вони широко застосовуються в харчовій, хімічній промисловості, в медицині та т.д.

Відомий теплообмінний апарат плівкового типу, що включає вертикальний корпус, який містить теплопередавальний канал, підключений до патрубків підведення і відведення охолоджуючої води, у верхній частині якого під патрубком підведення охолоджуючої води встановлено конусні плівкостворювачі [23]. Недоліком відомого пристрою є низькі значення коефіцієнта теплопередачі через можливість переливу холодоагенту всередину плівкового

розподільвача. При цьому холодоагент, який переливається, просто "провалюється" по центру теплопередавальної труби і не приймає участі в процесі тепловідбору, що зменшує сумарний коефіцієнт теплопередачі і призводить до збільшення витрати холодоагенту.

### 2.2.3 Переваги досліджуваної установки

Проаналізувавши контактні апарати подібні досліджуваному апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону, можна виділити наступні його переваги:

- спрощена конструкція установки, відносно малі її габарити;
- менші витрати матеріалу на апарат;
- саморегулювання режиму роботи апарата;
- висока енергоефективність.

## 2.3 Гідрогазодинаміка в контактному апараті з ежекторною подачею рідини в робочу зону

Контактний апарат з ежекторною подачею рідини в робочу зону працює при різних режимах течії двофазного газорідинного потоку. Залежно від режиму руху газоповітряної суміші в теплообмінному апараті, спостерігаються різні напрямлення потоку середовищ, які описані в пункті 2.4. До режиму захливання можемо бачити протиток газу з плівкою рідини, під час захливання і до появи циркуляції наглядно видно проточний барботажний шар, а вже після руйнування ерліфтного шару (повітря прориває водяний шар) повітря і вода рухаються в одному напрямку. Завдяки простоті запропонованого способу подачі рідини в робочу зону є можливість забезпечення необхідного режиму в контактному апараті, що збільшує коло його застосування в енергетиці.

### 2.3.1 Протиток газу з плівкою рідини і режим захливання

Режим захливання займає проміжне положення між областями стійкої низхідної і стійкої висхідної течії плівки рідини. Режим захливання течії, що характеризується порушенням гідродинамічної стійкості поверхні розділу фаз, зривом рідини з поверхні плівки і винесенням рідкої фази газовим потоком, спостерігається в певному діапазоні співвідношення витрат рідкої і газової фаз. Критичне значення швидкості газового потоку, відповідне початку режиму захливання, залежить від витрати рідини в плівці [24].

Взаємодія потоку газу і плівки рідини вперше теоретично розглянуто П.Л.Капицею в роботі [25]. Рішення отримано на підставі аналізу стійкості хвильового режиму течії плівки рідини і його енергетичного балансу. При цьому умови захливання течії визначені як умови



початку існування висхідного течії плівки рідини. Рівняння для визначення критичної швидкості газу в момент захлинання має вигляд, м/с:

$$(w_0)_{кр} = 3,5 \left( \frac{v \cdot g^{0,5}}{Q_m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

де  $Q_m$  – об’ємна щільність зрошування, м<sup>2</sup>/с;

$v$  – питомий об’єм, м<sup>3</sup>/кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

$\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>.

Або в безрозмірних величинах

$$K = Fr^{-2/3} Ka^{-1/12}, \quad (2.2)$$

де  $Fr$  – число Фруда;

$Ka$  – число Капіци.

Розглянута протиточна газорідинна система з низхідною плівкою рідини широко використовується в різних апаратах контактного типу і, зокрема, в апаратах, що застосовуються в якості утилізаторів теплоти відхідних виробничих газів або парогазових сумішей енергетичних установок. Разом з тим продуктивність таких апаратів обмежена відносно невисокою критичною швидкістю газу внаслідок виникнення явища захлинання течії і виносу рідини газовим потоком. Значні резерви збільшення продуктивності контактних газорідинних апаратів плівкового типу відкриваються в разі використання в них супутнього руху плівки рідини і потоку газу. Така ж схема руху середовищ може мати місце і в інших масообмінних апаратах плівкового типу. При цьому односпрямований рух плівки рідини і потоку газу або пари може бути організовано різними шляхами.

### 2.3.2 Прямоток газу з висхідною плівкою рідини

У парорідинних потоках висхідна прамоточна схема руху фаз може виникати природним чином в результаті адіабатного руху вологої пари на вертикальних ділянках паропроводів, а також в результаті випаровування рідини або конденсації пари в вертикальних трубах відповідно випарників і конденсаторів. У цих випадках плівковий режим течії відповідає кільцевому режиму

течії двофазного потоку, який має місце при певному співвідношенні видаткових характеристик окремих фаз.

### 2.3.3 Проточний барботаажний шар

В даній дослідній роботі спостерігається висхідний рух фаз, при якому дискретні утворення газу або пари рухаються разом з потоком безперервної рідкої фази, що характерно для проточного барботаажного шару, який реалізується, як правило, в каналах з невеликими поперечними розмірами.

Для організації проточного барботаажного шару в газорідинній системі необхідно забезпечити незалежне підведення в вертикальний канал рідини і газу з відповідними заданими витратами. При цьому важливим моментом є забезпечення таких умов подачі газу в двофазний шар, які забезпечували б безпровальний режим роботи барботаажної решітки і рівномірний розподіл газу в рідині з метою досягнення максимально розвиненої міжфазної поверхні [24].

## 2.4 Дослідження характерних режимів течії та умов їх виникнення

Дослідження режимів течії в активній зоні апарату і умов їх виникнення має велике значення для визначення оптимальних режимів роботи, при яких буде вирішена задача контактного теплообміну при одночасному забезпеченні мінімальних питомих енергетичних витрат. Ці дослідження були проведені на моделі контактного апарату з прозорими корпусом і барботаажною трубою, що дозволило візуалізувати режими течії в трубі і фіксувати їх за допомогою фотоапарата. Внутрішній діаметр труби дорівнював 43 мм, довжина - 170, 220 і 480 мм.

Аналіз можливих гідродинамічних режимів в контактному апараті показав, що співвідношення площ кільцевої щілини і поперечного перерізу труби  $\beta = F\delta/Fd$  справляє визначальний вплив на виникнення характерних гідродинамічних режимів. Якщо  $\beta = 1$ , то швидкості повітря в зазорі і в трубі однакові. При  $\beta < 1$  швидкість в щілині більше, ніж в трубі. При цьому захоплення рідини потоком повітря у внутрішню частину труби відбувається при менших швидкостях в трубі і режим захливання в трубі (ідентифікується по "стрибку" втрат тиску) настає при менших швидкостях газового потоку. Втрати напору в залежності від наведеної швидкості в трубі для різних зазорів  $\delta$  при  $d = 43$  мм і  $l = 480$  мм зображені на рисунку 2.4.

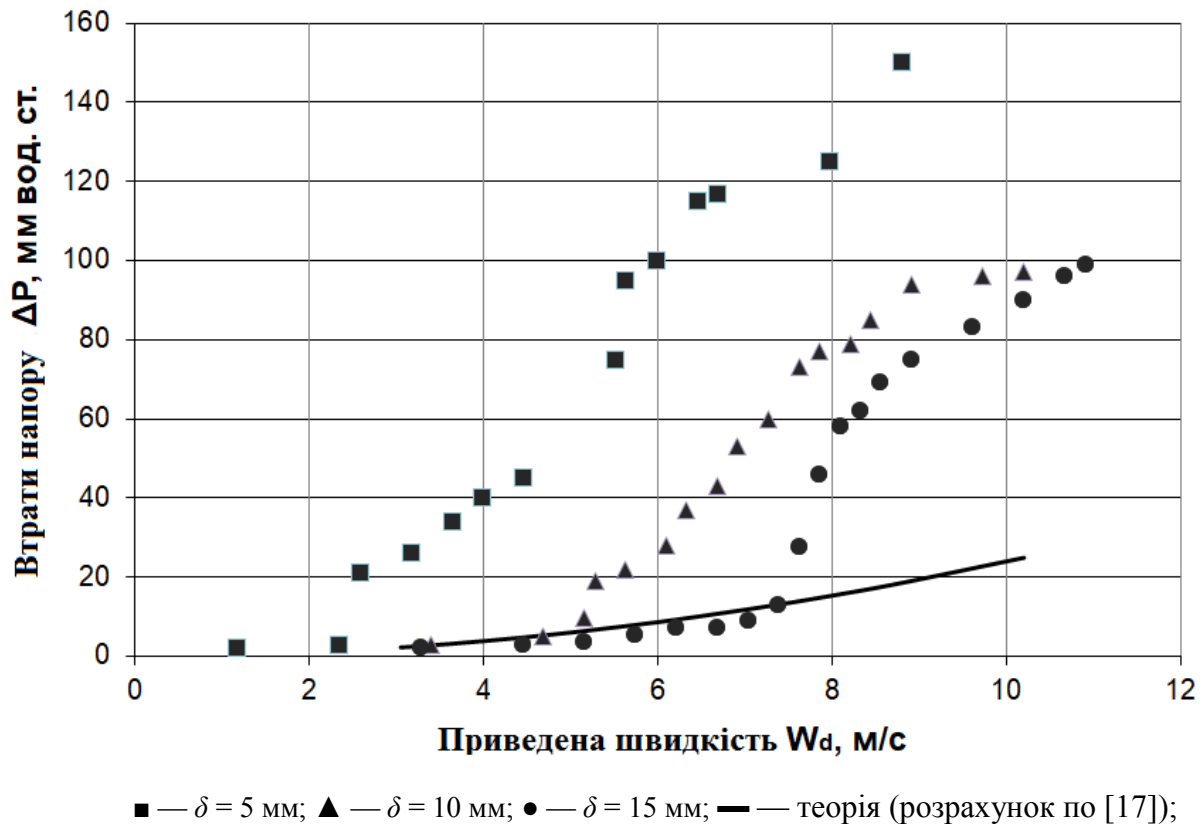


Рисунок 2.4 – Втрати напору в залежності від наведеної швидкості в трубі для різних зазорів  $\delta$  при  $d = 43$  мм и  $l = 480$  мм

Зі збільшенням наведеної швидкості повітря в трубі відбувається поступове зростання втрат тиску в апараті. При досягненні певної критичної швидкості відбувається стрибкоподібне збільшення втрат тиску, так зване захливання, з утворенням в нижній частині труби водяної пробки, через яку барботує повітря. Величина  $\beta$  визначає швидкість в барботажній трубі, при якій настає режим захливання. При подальшому збільшенні витрати повітря темп зростання втрат тиску сповільнюється з тенденцією виходу на постійне значення - відбувається руйнування водяній пробки з трансформацією режиму течії в кільцевий двофазний потік (повітря в ядрі, плівка рідини на стінці). Чим довше труба, тим більша кількість рідини сепарується на її стінках і менше крапель вилітає з труби. В результаті захливання відбувається при меншій швидкості повітря. У той же час, чим довше труба, тим більші втрати тиску при трансформації потоку в кільцевий режим, так як потрібно витратити більше енергії для викидання водяній пробки з труби. Втрати напору в залежності від наведеної швидкості в трубі для труб різної довжини з однаковим зазором  $\delta = 15$  мм і  $d = 43$  мм зображені на рисунку 2.5.

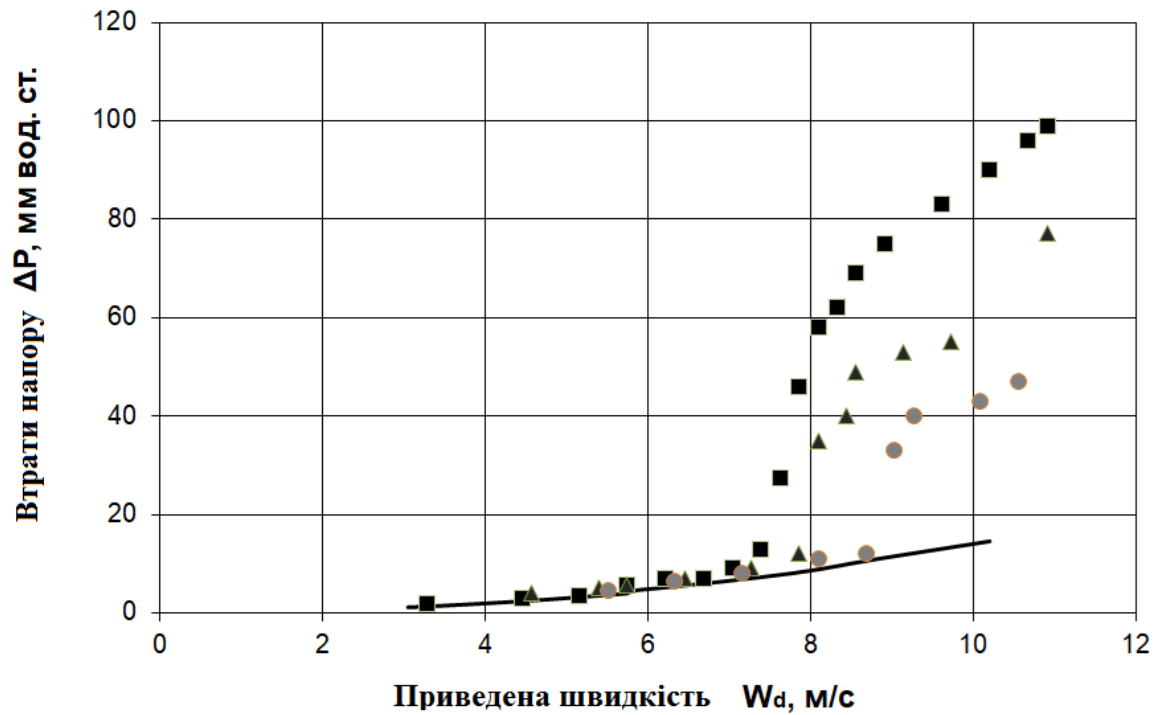


Рисунок 2.5 – Втрати напору в залежності від наведеної швидкості в трубі для труб різної довжини з однаковим зазором  $\delta = 15$  мм і  $d = 43$  мм

Нижче розглянуті характерні режими течії двофазного потоку для зазору  $\delta = 10$  мм і  $\beta = 1$ .

#### 2.4.1 Однофазний режим ( $\beta = 1$ , $w_d < 3$ м / с).

Нижній зріз труби (зображено на рисунок 2.6) розташовується над рівнем рідини з зазором  $\delta$ . При малих швидкостях повітря ( $w_d < 3$  м / с) захоплення води не відбувається. Втрати тиску в апараті мінімальні. Зі збільшенням витрати повітря на поверхні води з'являються хвилі. Втрати тиску повільно ростуть. Експериментальні дані добре збігаються (рисунок 2.4 і 2.5) з аналітичним розрахунком втрат тиску за формулою для однофазного потоку при наявності екрану, встановленого з зазором  $\delta$  на вході в трубу [26]:

$$\xi = \frac{\Delta P}{\rho w_0^2 / 2} \approx \zeta + \frac{\sigma}{n}, \quad (2.3)$$

де  $\zeta$  - коефіцієнт, який враховує вплив форми вхідної кромки;

$\sigma_1$  - коефіцієнт що враховує вплив  $\beta$ ;

$n = 1$ .

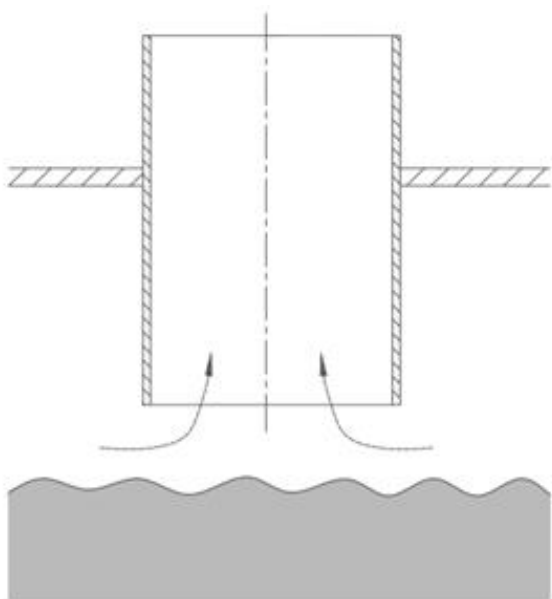


Рисунок 2.6 – Однофазний режим ( $\beta \geq 1$ )

При зменшенні зазору  $\delta$  ( $\beta < 1$ ) і збереженні постійних витрат повітря його швидкість в зазорі зростає, відповідно зростає міжфазне тертя між потоком повітря і поверхнею рідини. Це викликає радіальний рух рідини в напрямку осі труби.

При швидкості повітря в трубі і в щілині  $w_d \leq 3$  м/с в рідині під трубою виникає тороподібний вихровий рух рідини, при збереженні однофазного режиму руху повітря в трубі (рисунок 2.7).

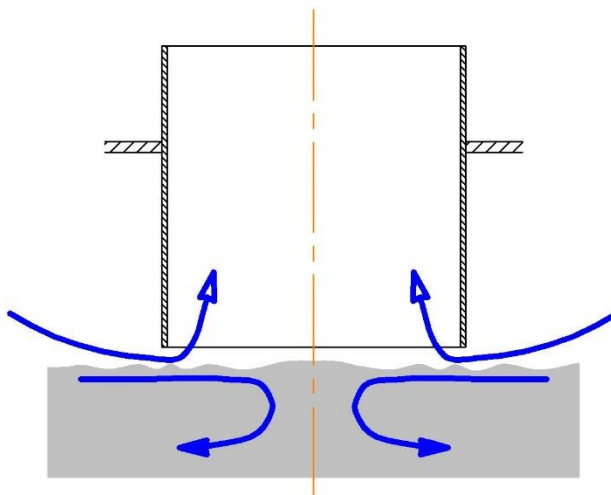


Рисунок 2.7 – Однофазний режим ( $\beta < 1$ )

При подальшому зменшенні зазору  $\delta$  і зростанні швидкості повітря в щілині до значень  $w_\delta = 3-6$  м/с в нижній частині труби може виникнути режим псевдозахливання. Рідина в щілині захоплюється повітрям і закидається в трубу, де вона при швидкості повітря  $w_d \leq 3$  м/с випадає

на поверхню дзеркала рідини або утворює в нижній частині труби пробку, через яку барботує повітря.

При значенні параметра  $\beta \geq 1$  режим течії двофазного потоку визначається наведеною швидкістю газорідної суміші в трубі. При  $\beta < 1$  визначальним параметром стає наведена швидкість в щілині  $\delta$ . При цьому режими течії двофазного потоку в трубі виникають ідентичні, але при  $\beta < 1$  вони спостерігаються при великих втратах тиску в апараті (рисунок 2.5).

#### 2.4.2 Крапельний режим ( $\beta = 1$ , $w_d = 3\text{--}5$ м/с)

При таких вхідних параметрах повітря починає захоплювати воду з гребенів хвиль у вигляді струменів і окремих крапель, які в більшій своїй частині сепаруються на стінках труби і стікають вниз в резервуар, а окремі краплі виносяться з потоком повітря в сепараційну камеру (рисунок 2.8). Спостерігається несуттєве збільшення гідравлічних втрат в порівнянні з розрахунком за залежністю (1.3).

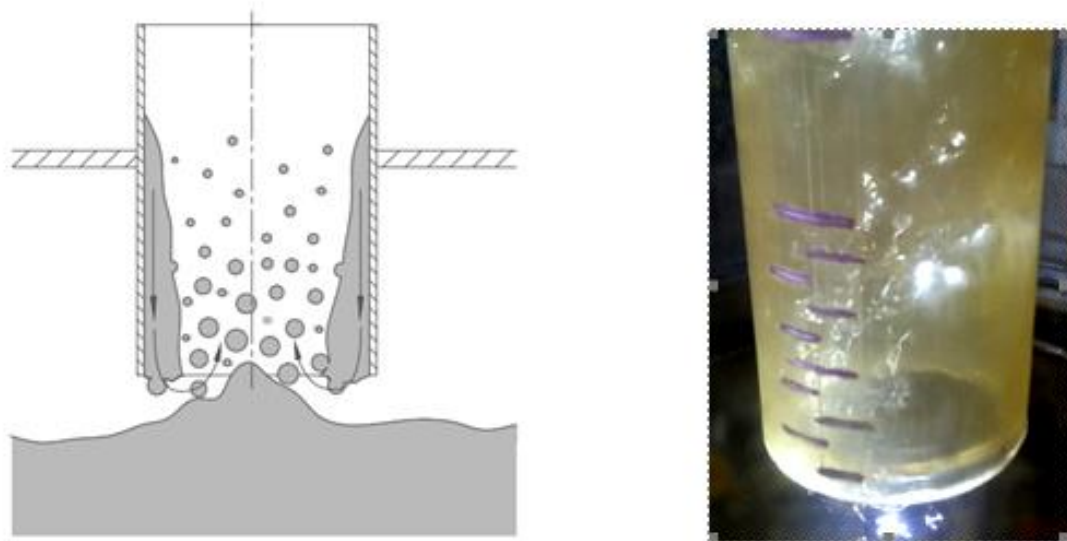


Рисунок 2.8 – Крапельний режим

#### 2.4.3 Режим захлинання ( $\beta = 1$ , $w_d \approx 5$ м/с)

При подальшому збільшенні швидкості повітря кількість води, що інжектуються в трубу, збільшується. Більша її частина сепарується на стінках труби і у вигляді плівки стікає вниз до нижнього зрізу труби, де підхоплюється свіжим повітрям і знову закидається в верхню частину труби. В результаті в нижній частині труби формується шар води, через який барботує повітря (рисунок 2.9). Втрати тиску при цьому стрибкоподібно зростають (рисунки 2.4 і 2.5). Виникає захлинання потоку.

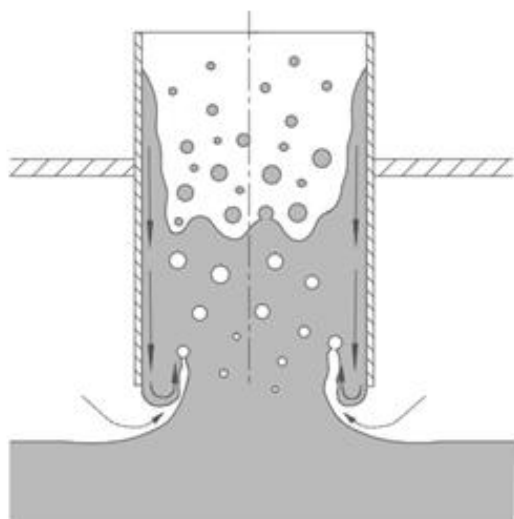


Рисунок 2.9 – Режим захлинання

#### 2.4.4 Створення ерліфтного ефекту ( $\beta = 1$ , $w_d = 5-8$ м/с)

У цьому діапазоні швидкостей повітря висота стовпа рідини, через який барботує повітря, поступово зростає до появи циркуляції (ерліфтний ефект): вода переливається через край труби в сепарційну камеру і повертається по переливній трубці у вхідні камеру (рисунок 2.10) при збереженні монотонного темпу зростання втрат тиску (рисунок 2.4).

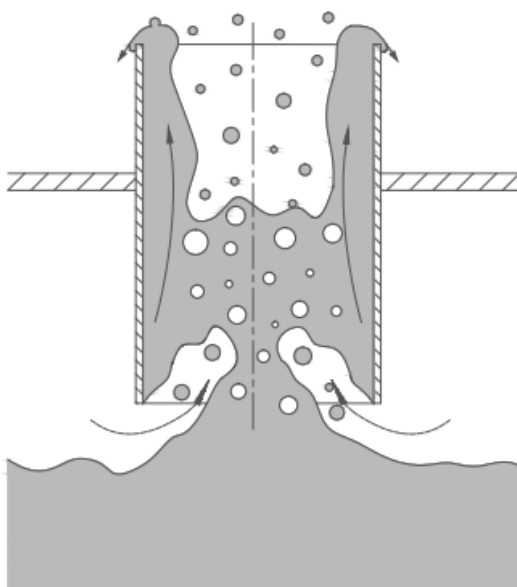


Рисунок 2.10 – Режим з ерліфтним ефектом

#### 2.4.5 Руйнування ерліфтного шару ( $\beta = 1$ , $w_d > 12$ м/с)

При зростанні наведеної швидкості повітря в трубці до значень  $> 12$  м/с потік повітря "прориває" водяний шар. Плівка води рухається прямою з повітрям і переливається в

сепараційну камеру (рисунок 2.11). Можна ввести поняття коефіцієнта рециркуляції. Зростання втрат тиску істотно сповільнюється (рисунок 2.4).

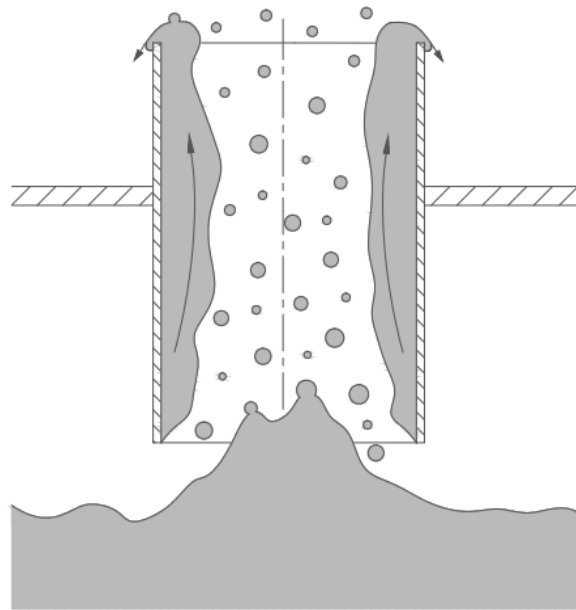


Рисунок 2.11 – Руйнування барботажного шару

#### 2.4.6 Аналіз результатів. Порівняння з іншими роботами.

Основною причиною різкого стрибка тиску на рисунках 2.4 і 2.5 є захлинання ("flooding") потоку, коли швидкість газу досягає значення, при якому починається зміна напрямку руху плівки рідини. Поєднання режимних та геометричних параметрів контактного апарату, при яких реалізується режим захлинання, залежить від витрат рідкої і газоподібної фаз, геометрії і орієнтації робочої ділянки. Явище захлинання досліджувалося багатьма авторами [7-19].

Зіставлення наших результатів по захлинанню при  $\beta \geq 1$  з даними роботи [7] для труби діаметром 32 мм і при верхньому підводі рідини показує задовільне узгодження. Всі експериментальні точки при режимі захлинання потрапляють в виділену еліпсом зону (рисунок 2.12).

При  $\beta < 1$  режим захлинання (псевдозахлинання) виникає при менших значеннях наведеної швидкості в трубі  $w_d$  (рисунок 2.13). Однак, якщо за визначальну швидкість для фіксації режиму захлинання прийняти швидкість в зазорі  $\delta$  між нижнім обрізом труби і рівнем рідини в корпусі  $w_\delta$ , то експериментальні точки також потрапляють в обмежену еліпсом зону (рисунок 2.12). При цьому слід зазначити, що довжина труби не впливає на початок виникнення явища захлинання і на загальні втрати тиску в системі. Це легко пояснити, так як захлинання відбувається при швидкості повітря в трубі, яка відповідає однофазному режиму при  $\beta \geq 1$  (рисунок 2.6), однак при



малому зазорі ( $\beta < 1$ ) частина рідини закидається в трубу і в нижній її частині виникає режим псевдозахлинання.

Слід зазначити, що при нашому варіанті подачі рідини в барботажну трубу зміною зазору  $\delta$  (параметр  $\beta$ ) можна реалізувати бажаний режим двофазного потоку в барботажній трубі.

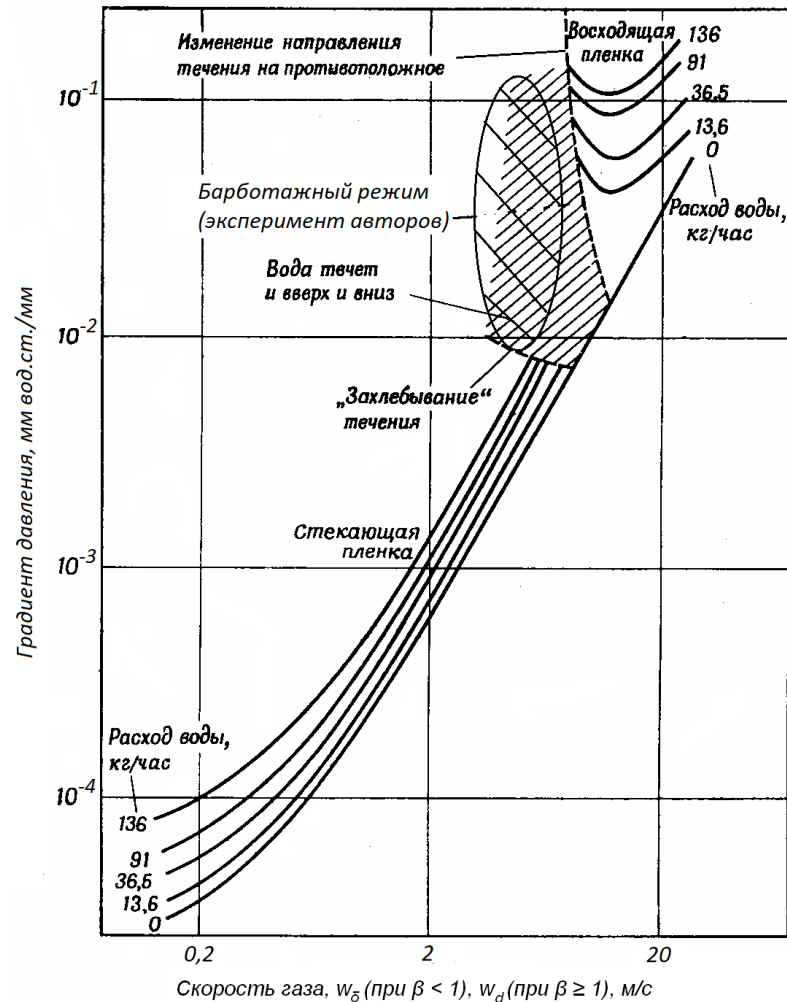


Рисунок 2.12 – Порівняння отриманих результатів з роботою [7]

При  $\beta \ll 1$  і низькій швидкості газу в барботажній трубі буде переважно протиточний режим руху фаз. Плівка, яка утворюється на стінках труби з крапель, що закидаються через зазор  $\delta$  в трубу, рухається вниз. При  $\beta = 0.3-0.8$  і швидкості газу 3-5 м/с в нижній частині труби утворюється режим псевдозахлинання (рисунок 2.7). При цьому рідинна пробка утворюється тільки в нижній частині барботажної труби, що сприяє зменшенню виносу рідини з газом, а також зниження втрат тиску в контактному апараті. При  $\beta \geq 1$  виникнення в барботажній трубі кільцевого двофазного потоку представляється можливим тільки при швидкостях газової фази, що перевищують швидкість захлинання, тобто в трубі буде реалізований спутний розшарований потік - рідина переважно на стінці, а газова фаза в ядрі потоку.

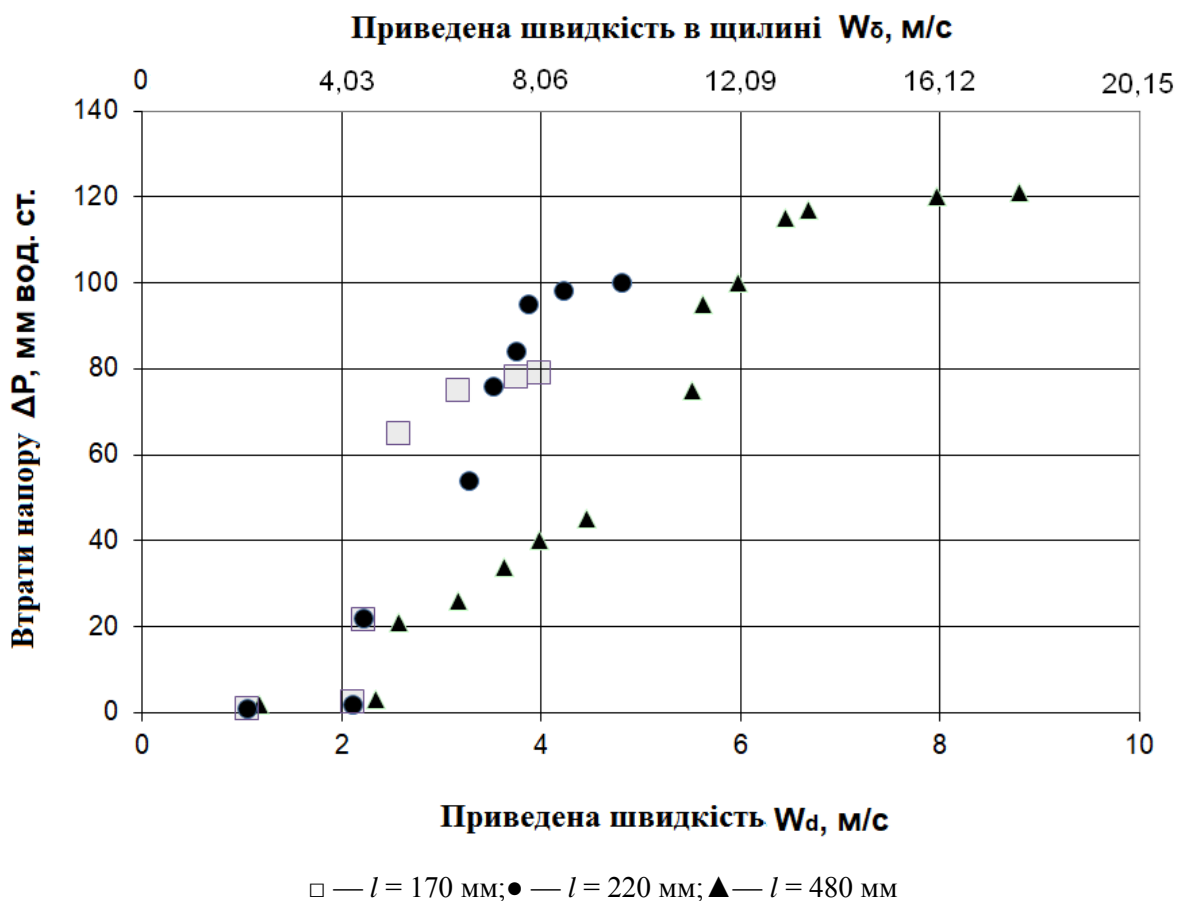


Рисунок 2.13 -- Втрати напору в залежності від швидкості в трубі для труб різної довжини з однаковим зазором  $\delta = 5$  мм при  $d = 43$  мм

## 2.5 Тепломасообмін у контактному апараті

У даний час відомі спроби створення узагальнюючої теорії розрахунку процесів тепло і масообміну в контактних апаратах різних типів. Проте, кожен тип газорідної системи характеризується своїми фізичними особливостями протікання тепломасообмінних процесів і подальше вивчення цих процесів стосовно окремим двофазним системам і систематизація відповідних результатів досліджень безсумнівно є актуальними завданнями.

В даний час відомі спроби створення узагальнюючої теорії розрахунку процесів тепло і масообміну в контактних апаратах різних типів. Проте, кожен тип газорідної системи характеризується своїми фізичними особливостями протікання тепломасообмінних процесів і подальше вивчення цих процесів стосовно окремим двофазним системам і систематизація відповідних результатів досліджень безсумнівно є актуальними завданнями.

Особливістю досліджень тепломасообмінних характеристик барботажного шару є труднощі визначення активної поверхні контакту фаз, а також зміна характеру взаємодії фаз при зміні їх параметрів. Труднощі у визначенні активної поверхні розділу фаз пов'язані не тільки зі

статистичним характером розподілу розмірів газових бульбашок, а й з визначенням висоти двухфазного шару, в межах якої відбувається активний тепло і масообмін. Тому експериментальне вивчення процесів тепло і масообміну в барботажному шарі пов'язано з дослідженням супутніх характеристик, необхідних для визначення коефіцієнтів переносу.

#### 2.5.1 Рушійні сили процесів тепло і масообміну

Теплообмін. Відомо, що рушійною силою процесів теплопереносу є градієнт температур в даній точці простору або різниця температур (температурний напір) в характерних точках розглянутої області середовища. У деяких роботах в якості рушійної сили процесу теплообміну замість різниці температур використовують різницю ентальпій взаємодіючих середовищ, яка, однак, може бути реальною рушійною силою тільки при однакових теплоємностях цих середовищ, так як при кінцевій різниці ентальпій внаслідок різних значень теплоємностей, але при однаковій температурі теплообмін не відбувається. У звичайній розрахунковій практиці користуються середньологарифмічними або середньоарифметичними температурними напорами, які є окремими випадками середньоінтегральних температурних напорів, отриманими в залежності від характеру розподілу температур взаємодіючих середовищ. Конкретний вид зазначених температурних напорів залежить від прийнятої схеми руху теплоносіїв [24].

Тепломасообмін. Визначення реальної рушійної сили перенесення в процесах теплообміну, ускладнених масообміном за рахунок випаровування рідини або конденсації пари, в загальному випадку є досить складним завданням. Залежно від початкових параметрів контактуючих середовищ характер взаємодії середовищ може змінюватися по ходу їх руху як з точки зору відносного вкладу масообміну в повний теплообмін, так і з точки зору напрямку процесу масообміну. При цьому рушійними силами повного теплообміну можуть виступати різні різниці температур, що враховують вплив масообміну, в залежності від характеру технологічної обробки контактуючих середовищ або напряму теплового потоку.

Масообмін. В якості розрахункових потенціалів рушійної сили процесу масообміну можна прийняти різні величини: молярні або масові концентрації компонентів, їх парціальні тиски або вологовміст газу. У практичних розрахунках масообміну приймають різниці цих потенціалів в ядрі потоку та на кордоні з рідиною. При зміні параметрів системи в досить широкому діапазоні параметрів доводиться осереднювати характерні різниці потенціалів. При цьому використання різних величин в якості потенціалів перенесення при обчисленні рушійної сили процесу може призводити до різних результатів. В роботі [27] показано, що різні з перерахованих різниць величин можуть рівноправно використовуватися як рушійні сили масообміну тільки при ізотермічних або близьких до них умовах, тобто у вузькому діапазоні зміни параметрів середовищ.

### 2.5.2 Обробка первинних даних

Первинні дані, які потрібні для розрахунків дослідів:

- 1) обчислення вологості  $\varphi$ , вологовмісту  $d$  і теплоємності  $i$  на вході і виході досліджуваного випарника;
- 2) обчислення витрат повітря  $Q_p$  і рідини  $G_p$ ;
- 3) обчислення кількості тепла, що передається від рідини повітрю  $Q_p$ . Визначення нев'язки теплового балансу  $(Q_p - Q_n) / Q_p$ ;
- 4) визначення параметрів повітря (ентальпій) поблизу поверхні рідини;
- 5) обчислення середнього ентальпійного напору  $\Delta i_{cp}$ ;
- 6) обчислення коефіцієнта масовіддачі  $\beta$ ;
- 7) обчислення швидкості газової фази в сітчастому шарі і продуктивності апарату.

Для обробки первинних даних використовуються наступні залежності.

Відносну вологість повітря розраховуємо за формулою, %:

$$\varphi = \frac{P_M}{P_C} - A \frac{B}{P_M} \cdot (t_C - t_M) , \quad (2.4)$$

$$\text{де } A = (65 + \frac{6,57}{W}) \cdot 10^{-5};$$

$B$  – барометричний тиск;

$P_C$  і  $P_M$  – тиск насичення при температурі сухого  $t_C$  і мокрого  $t_M$  термометрів, обчислюються по залежності:

$$\lg P = \frac{156 + 8,12t}{236 + t} . \quad (2.5)$$

Для визначення вологовмісту використаємо формулу, г/(кг сп):

$$d = 622 \frac{\varphi \cdot P_M}{B \cdot \varphi \cdot P_C} . \quad (2.6)$$

Ентальпія вологого повітря, в контактному апараті визначається за формулою, кДж/кг:

$$i = t + 0,001 \cdot d \cdot (2493 + 1,97t) . \quad (2.7)$$

Витрата повітря і рідини обчислюються по залежностям, відповідно, м<sup>3</sup>/с та л/год відповідно:

$$V_{\Pi} = 1,2427 \cdot 10^{-4} + 6,653 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,28 \cdot 10^{-7} \cdot x^2, \quad ; \quad (2.8)$$

$$G_p = 1,8438 \cdot x + 25, \quad . \quad (2.9)$$

де  $x$  – тиск газового і рідинного ротаметрів.

Продуктивність апарату по конденсату розраховується за формулою, кг/год:

$$G = G_{\Pi} \times (d_2 - d_1) \times 3600, \quad , \quad (2.10)$$

де  $G_{\Pi}$  – масова витрата повітря, кг/с.

### 2.5.3 Методика дослідження та її обґрунтування

У масообмінному випарнику є можливість реалізації найбільш вигідної протиточної схеми взаємодії теплоносіїв.

Прийнявши допущення про сталість фізичних властивостей теплоносіїв, коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  і масовіддачі  $\beta$ , рівність парціального тиску повітря барометричному тиску, витрати води рівними  $G_p = G_{p2} = G_p$ , а шар насадки товщиною  $dh$  можна записати наступним чином.

1. Кількість теплоти, втраченої водою розраховується за формулою

$$dQ = - G_p \cdot c_p \cdot \frac{dt}{dh} \cdot dh, \quad (2.11)$$

де  $c_p$  – питома теплоємність рідини, Дж/кг·К.

2. Кількість теплоти, що йде на нагрів повітря рівна

$$dQ_a = G_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot \frac{dV}{dh} \cdot dh \quad (2.12)$$

де  $c_{\Pi}$  – питома теплоємність повітря, Дж/кг·К.

3. Кількість теплоти, віднімати випаровуванням і витраченого на збільшення вмісту вологи повітря

$$dQ_{\beta} = d(G_p \times r_0) = G_{\Pi} \times r \times \frac{dx}{dh} \times dh. \quad (2.13)$$

Склавши рівняння теплового балансу для виділеного шару  $dh$  і зробивши нескладні перетворення, а також скориставшись аналогією між тепло- і масообміном, що враховує напівпроникність межі розподілу фаз газ-рідина і ту, що дається для тиску, близького до атмосферного, наступне співвідношення між коефіцієнтами тепловіддачі і масовіддачі:

$$a = \beta \times c_{\Pi} \times \left( \frac{P - P_{\Pi}}{P} \right) \quad (2.14)$$

можна отримати

$$\frac{G_{\Pi}}{\beta \times dF} \times \frac{di}{i'' - i} = \frac{G_p \times c_p}{\beta \times dF} \times \frac{dt}{i'' - i} = 1 \quad (2.15)$$

Це рівняння враховує загальну кількість тепла, переданого в апараті конвекцією, теплопровідністю і випаровуванням.

В інтегральній формі рівняння записується так:

$$\frac{G_{\Pi}}{\beta \cdot F} \cdot \frac{i_2 - i_1}{\Delta i_{cp}} = \frac{G_p \cdot c_p}{\beta \cdot F} \cdot \frac{t_1 - t_2}{\Delta i_{cp}} \quad (2.16)$$

де  $t_1$  – температура рідини на вході у випарник;

$t_2$  – температура рідини на виході з випарника;

$i_1$  – ентальпія повітря на вході в апарат;

$i_2$  – ентальпія повітря на виході з апарату;

Наближене значення  $\Delta i_{cp}$  можна знайти по методу Бермана Л.Д. :

$$\Delta i_{cp} = \frac{(i_1'' - i_2) - (i_2'' - i_1)}{\ln \frac{i_1'' - i_2 - \delta i''}{i_2'' - i_1 - \delta i''}} \quad (2.17)$$

$$\delta i'' = \frac{i_1'' + i_2'' - 2i_m''}{4}, \quad (2.18)$$

де  $i_m''$  - ентальпія насиченого повітря при температурі  $t_{cp} = \frac{t_1 - t_2}{2}$  ;

$i_1''$  - ентальпія насиченого повітря біля поверхні води при  $t_1$ ;

$i_2''$  - ентальпія насиченого повітря біля поверхні води при  $t_2$ ;

Із (2.16) знаходимо:

$$\beta = \frac{G_{\Pi} \times (i_2 - i_1)}{F \times \Delta i_{cp}} = \frac{G_p \times c_p (t_1 - t_2)}{F \times \Delta i_{cp}} \quad (2.19)$$

Таким чином, ми отримаємо вираз (2.19), який можна використовувати для обчислення коефіцієнта масовіддачі  $\beta$ , віднесеного до різниці вологовмісту газу поблизу поверхні рідини і далеко від неї, за виміряними в досліді витратами і параметрами теплоносіїв.

## 2.6 Результати дослідження тепломасообміну

В цьому пункті приводяться результати досліджень тепломасообміну в контактному апараті з ежекторною подачею рідини в робочу зону. В якості робочої рідини для проведення дослідження використовувалася вода, яка поступово нагрівалася і захоплювалася повітрям кімнатної температури.

Використання газорідинної системи у вигляді атмосферного повітря і підігрітої води може бути достатньо ефективним при охолодженні води (градирні), так як супутній цьому процес масовіддачі при випаровуванні води сприяє вирішенню цільової практичної задачі.

Перед проведенням дослідів по тепломасообміну був встановлений вплив режимних параметрів, спосіб подачі повітря в робочу камеру і геометричні характеристики камери та структуру потоку, визначені межі кожного режиму. Результати цих досліджень описані в пунктах 2.1-2.5.

В ході експериментів вимірювалися наступні параметри: витрата повітря, витрата води, температура води, температура повітря за сухим термометром на вході та виході, температура повітря за мокрим термометром на вході та виході.

Отримавши значення необхідних параметрів був проведений розрахунок коефіцієнту масовіддачі (формула 2.19) за допомогою програми Microsoft Office Excel. Результати розрахунків записані в таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 – Результати розрахунків

Параметри повітря на вході				Параметри повітря на виході				$G_p$ , м3/год	$F_{тр}$ , м <sup>2</sup>	Параметри води		$\Delta i_{ср}$ , Дж/кг	$\beta$ , $\frac{кг}{м^2 \cdot c}$	$Q_{мас}$ , кВт	$F \cdot \beta_d$	$Q_{заг}$ , кВт
$t_{п1}$ , °C	$t_{м1}$ , °C	$i_1$ , Дж/кг	$i_1^{100\%}$ , Дж/кг	$t_{п2}$ , °C	$t_{м2}$ , °C	$i_2$ , Дж/кг	$i_2^{100\%}$ , Дж/кг			$t_{в}$ , °C	$i_{в}$ , Дж/кг					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
16,1	13,4	37946	145838	36,2	36,1	137914	145838	37	0,035105	37,2	155913	38283	0,8665	0,901	0,0108	1,164
16,2	13,4	37944	151096	36,8	36,7	142181	151096	37	0,035105	37,9	158839	41023	0,8417	0,942	0,0108	1,212
16,4	13,6	38474	153405	37,2	37	144353	153405	30	0,035105	38,2	160093	41662	0,8406	0,957	0,0108	1,229
16,5	13,9	39283	181140	40,5	40	167941	181140	22	0,035105	41,5	173885	54180	0,6311	0,944	0,0089	1,200
16,8	14,1	39821	272216	46,7	46,7	235195	272216	19,5	0,035105	49,6	207745	106358	0,3513	1,070	0,0067	1,312
12,2	11	32424	272817	45,6	44,1	210642	272817	20	0,035105	49,2	206071	131786	0,2272	0,823	0,0059	1,051
12,3	11	32422	256700	44,7	44	209651	256700	32,5	0,035105	48	201053	113484	0,2694	0,845	0,0060	1,073
12,5	11	31925	189580	38	37,7	152482	189580	45	0,035105	42	175972	83324	0,4128	0,921	0,0096	1,208
12,6	11,4	33415	156426	33,4	33,2	121111	156426	45	0,035105	38,2	160090	70271	0,4985	0,910	0,0131	1,230
12,8	11,7	34170	352435	29,6	29,5	99832	352435	50	0,035105	54,2	226980	284171	0,1035	0,746	0,0144	1,032
10,7	7,8	24474	225133	38	37,5	147567	225133	29	0,035105	45,9	192277	129507	0,2507	0,859	0,0085	1,140
10,9	7,9	24689	134041	30,7	30,7	104155	134041	29	0,035105	35,6	149227	61260	0,3481	0,547	0,0084	0,749
11	8	24906	62339	19,7	19,7	56749	62339	27,5	0,035105	21,3	89445	16745	0,4963	0,208	0,0078	0,292
11,2	8,1	25123	39243	14,2	14,2	40055	39243	26	0,035105	13,9	58468	13985	0,5117	0,103	0,0073	0,131
11,4	8,1	25120	33556	12,2	12,1	34554	33556	32,5	0,035105	11,7	49248	13451	0,5384	0,094	0,0092	0,104
11,6	8,3	25558	53113	17,7	17,1	48388	53113	33	0,035105	18,6	78148	12947	0,5544	0,181	0,0093	0,252
11,9	8,6	26231	99360	27,2	27,2	86546	99360	33	0,035105	29,8	124986	34633	0,5352	0,474	0,0095	0,651

Продовження таблиця 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
12,4	9	27113	160824	36	35,5	133327	160824	32,5	0,035105	39,2	164272	67156	0,4682	0,832	0,0095	1,104
13,1	9,5	28245	52149	18,1	17,7	50243	52149	38,2	0,035105	18,3	76893	8698	0,9166	0,212	0,0108	0,280
13,1	9,5	28245	87950	25,9	25,6	79348	87950	38,2	0,035105	27,5	115372	26377	0,6897	0,467	0,0109	0,639
13,4	9,7	28703	141743	34,1	34	123520	141743	38,2	0,035105	36,7	153824	51952	0,6364	0,881	0,0111	1,161
16,4	13,6	38373	228550	44,6	44,4	208793	228550	22,5	0,035105	46,2	193531	75258	0,4481	0,953	0,0068	1,184
16,5	13,8	38909	181448	39,7	39,7	164924	181448	32	0,035105	41,6	174303	58481	0,6144	0,995	0,0095	1,261
16,6	14	39449	143914	36,8	36,8	142463	143914	38	0,035105	37	155078	24087	0,6488	0,960	0,0111	1,234
16,6	14	39449	139602	36,8	36,8	142463	139602	38	0,035105	36,4	152570	36543	0,4265	0,960	0,0111	1,234
16,7	14,1	39719	146857	35,4	35,2	131325	146857	43	0,035105	37,4	156750	47435	0,7482	0,961	0,0125	1,246
16,7	14,2	39993	146116	35,5	35,2	131318	146116	43	0,035105	37,3	153332	46355	0,7630	0,955	0,0125	1,242
16,8	14,3	40265	138896	34,3	34	123508	138896	48	0,035105	36,3	152152	44807	0,8055	0,970	0,0140	1,267

У зв'язку з складністю визначення дійсної поверхні контакту рідини і газу у контактному апараті на рисунку 2.14 приведена залежність добутку коефіцієнта масовіддачі на невідому дійсну поверхню контакту фаз  $F^*\beta_d$  в залежності від приведеної швидкості  $W$  на вході в барботажну трубу.

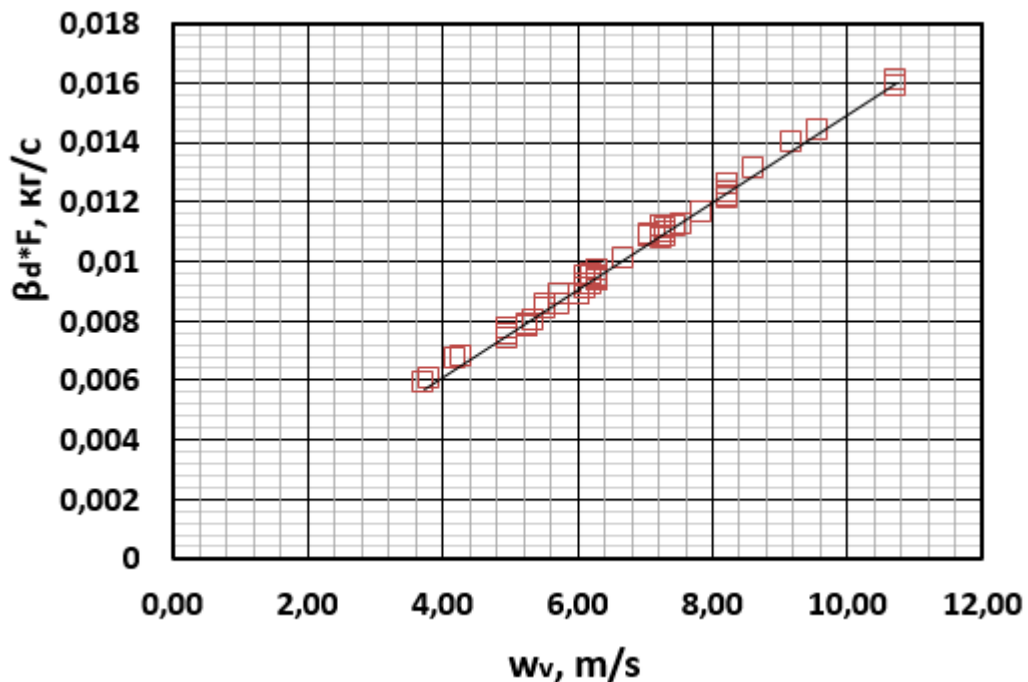


Рисунок 2.14 – Вплив величини швидкості повітря на величину  $F^*\beta_d$

З рисунка 2.14 видно, що експериментально отримані коефіцієнти  $F^*\beta_d$  дуже добре узагальнюються лінійною залежністю, аргументом якої є приведена швидкість повітря на вході в барботажну трубу.

## 2.7 Висновки до розділу 2

Було описано фізичну картину роботи контактного теплообмінника з інжекційним введенням рідкої фази, виділені характерні режими течії двофазного водоповітряного потоку, досліджені втрати тиску в елементарному елементі такого апарата - короткій вертикальній трубі. Отримано гарний збіг при порівнянні втрат тиску в наших дослідженнях з даними інших авторів при всіх швидкостях газової фази в трубі.

Запропонований інжекційний спосіб подачі рідкої фази в газовий потік дозволяє за рахунок зміни зазору між обрізом труби і дзеркалом рідини реалізувати різні режими течії при швидкостях менших швидкості захлинання, що має місце в апаратах традиційної конструкції. Простота запропонованого способу організації контактного теплообміну і можливість

забезпечення необхідного режиму дає перспективу його використання в контактних апаратах систем утилізації теплоти відхідних газів, різноманітних зволожувачах та інших установках енергетичного обладнання.

Проведені експериментальні дослідження масообміну у вертикальній трубі контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону узагальнені наступною експериментальною залежністю:

$$F \cdot \beta_d = A \cdot W^n \quad (2.20)$$

де  $F$  – площа поверхні барботажної труби,  $\text{м}^2$ ;

$\beta_d$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$W$  – приведена швидкість повітря на вході в барботажну трубу,  $\text{м}/\text{с}$ .

Залежність у явному вигляді має вигляд:

$$F \cdot \beta_d = 0,001 \cdot W^{1,15} \quad (2.21)$$

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ПОВІТРЯ В МОДЕЛІ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТУ В SOLIDWORKS**

SolidWorks (солідворкс, від англ. Solid - тверде тіло і англ. Works - працювати) - програмний комплекс системи автоматизованого проєктування (САПР) для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення.

#### **3.1 Постановка задачі**

У цьому розділі проведено дослідження руху повітря в моделі контактного апарату, описаного в дипломній роботі (контактний теплообмінний апарат з ежекторною подачею рідини в робочу зону).

Мета дослідження: порівняння швидкостей повітря при різній витраті повітря, а також при двох варіантах конструкції теплообмінного апарату.

Задачі, які необхідно вирішити:

- 1) створення трьохвимірної моделі досліджуваного апарату та теоретичний аналіз процесу руху повітря в ній;
- 2) визначення швидкостей руху повітря залежно від зміни його витрати;
- 3) оцінка впливу наявності розподільвача повітря на швидкість повітря всередині апарату;
- 4) висновки щодо ефективності використання розподільвача повітря.

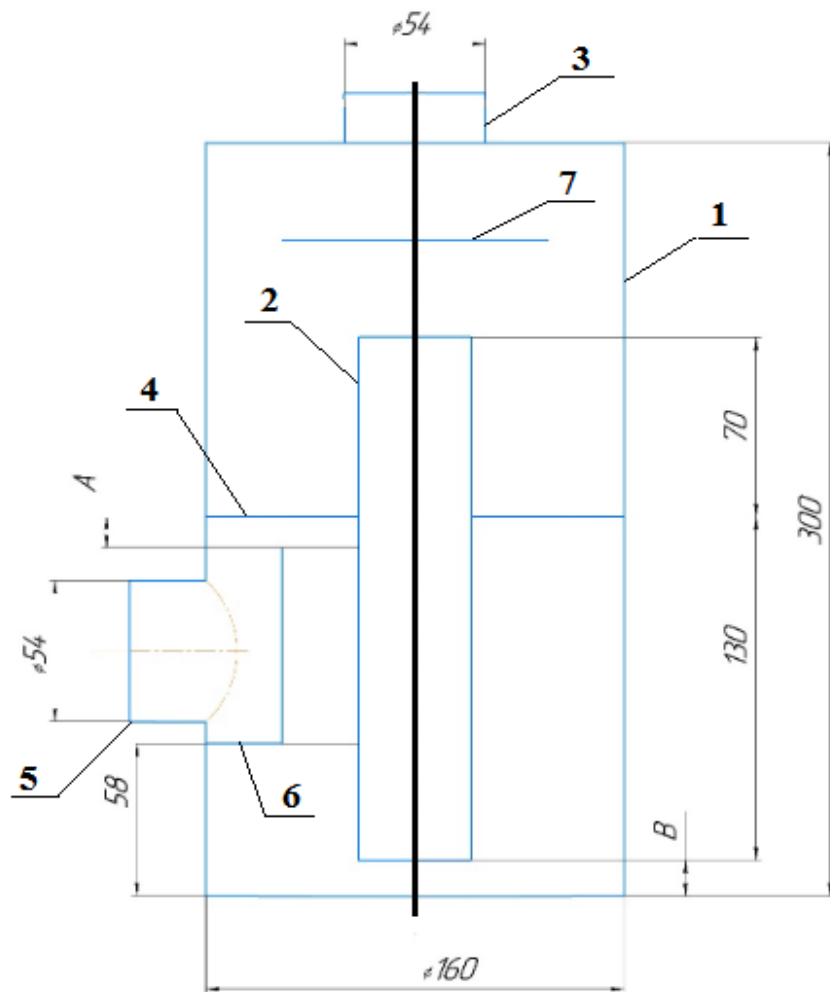
#### **3.2 Створення геометричної моделі**

Для проведення дослідження був обраний програмний комплекс САПР – SolidWorks, який дає можливість створити середовище, подібне тому, в якому створюється і змінюється фізична модель.

Дослідження проводилося на спрощеній моделі контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону при двох випадках :

- 1) теплообмінний апарат з ежекторною подачею рідини без розподільвача повітря;
- 2) теплообмінний апарат з ежекторною подачею рідини з розподільвача повітря.

На рисунку 3.1 зображена спрощена схема моделі апарату для двох випадків: зліва показаний апарат з розподільвачем повітря, а справа – без розподільвача.



1 – корпус; 2 – барботажна труба; 3 – вхідний патрубок повітря; 4 – перегородка; 5 – вхідний патрубок повітря; 6 – розподільвач повітря; 7 – сепаратор; А – відстань між розподільвачем повітря і перегородкою; В – відстань між нижнім обрізом труби і водою

Рисунок 3.1 – Спрощена схема дослідної моделі

У програмі SolidWorks було змодельовано два варіанти дослідної установки, які показані на рисунках 3.2 та 3.3. Для рівномірного надходження повітря до теплообмінника використаємо розподільвач повітря.

Повітря надходить через вхідний патрубок та «врізається» в розподільвач, потім потрапляє в нижню камеру теплообмінника і з неї направляється в верхню камеру через барботажну трубу. Так як SolidWorks не має функції змішування двох різних середовищ (в нашому випадку повітря і вода), то рівень води в принциповій схемі відображає дно корпусу.

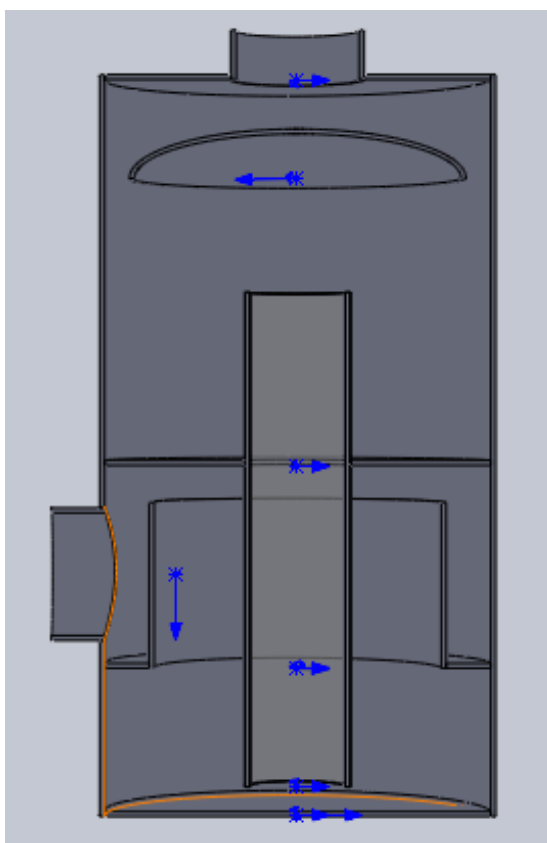


Рисунок 3.2 – Контактний теплообмінний апарат з розподільвачем повітря (в розрізі)

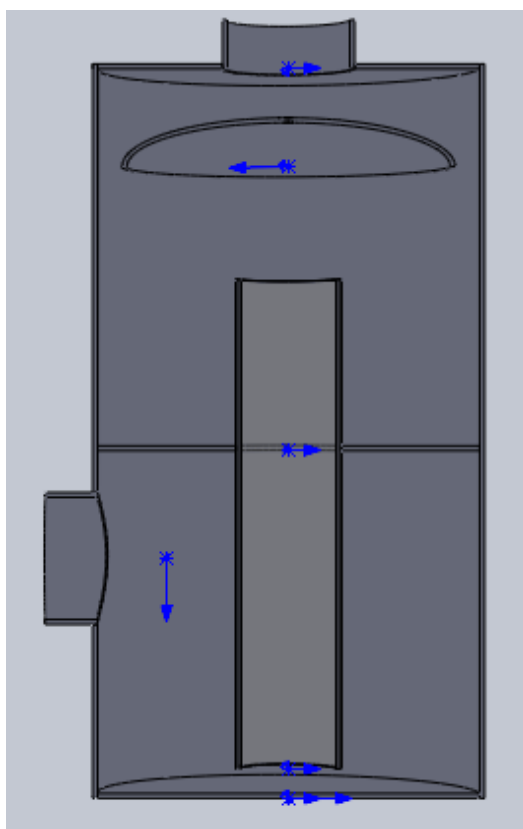


Рисунок 3.3 – Контактний теплообмінний апарат без розподільвача повітря (в розрізі)

### 3.3 Проведення дослідів та їх аналіз

Щоб наглядно показати рух повітря в досліджуваному апараті та визначити його швидкість, скористаємося допоміжною програмою SolidWorks – «Flow Simulation».

Для отримання результатів виконаємо наступні команди:

- 1) створюємо проект;
- 2) задаємо граничні умови: об'ємну витрату повітря на вході, тиск оточуючого середовища;
- 3) проводимо розрахунок, завантажуюмо результати;
- 4) задаємо області траєкторії потоку та задаємо стартові точки;
- 5) отримуємо кінцевий результат, на якому зображено напрямок руху повітря та вказані його швидкості в кожній точці.

Для збільшення ефективності роботи досліджуваної установки, було встановлено розподільувач повітря, який дає можливість рівномірно подавати повітря в апарат. За допомогою програми Flow Simulation, визначимо найбільш оптимальну відстань між розподільувачем повітря та перегородкою, яка розділяє корпус установки на нижню і верхню камери (рисунок 3.1). Цю відстань будемо позначати літерою А.

У таблиці 3.1 наведені значення відстані А, які використовуються в дослідях.

Таблиця 3.1 – Значення відстані А

Дослід	Значення відстані А, мм
1	5
2	10
3	15

Щоб визначити швидкість руху повітря в контактному апараті, задаємося такими значеннями об'ємної витрати повітря: 0,0064 м<sup>3</sup>/с, 0,00903 м<sup>3</sup>/с, 0,0105 м<sup>3</sup>/с, 0,0118 м<sup>3</sup>/с, 0,0133 м<sup>3</sup>/с. Ці дані було отримано при проведенні дослідів в лабораторії.

На рисунках 3.4 та 3.5 наглядно показаний напрямок руху повітря в контактному апараті з розподільувачем повітря та без розподільувача повітря відповідно.



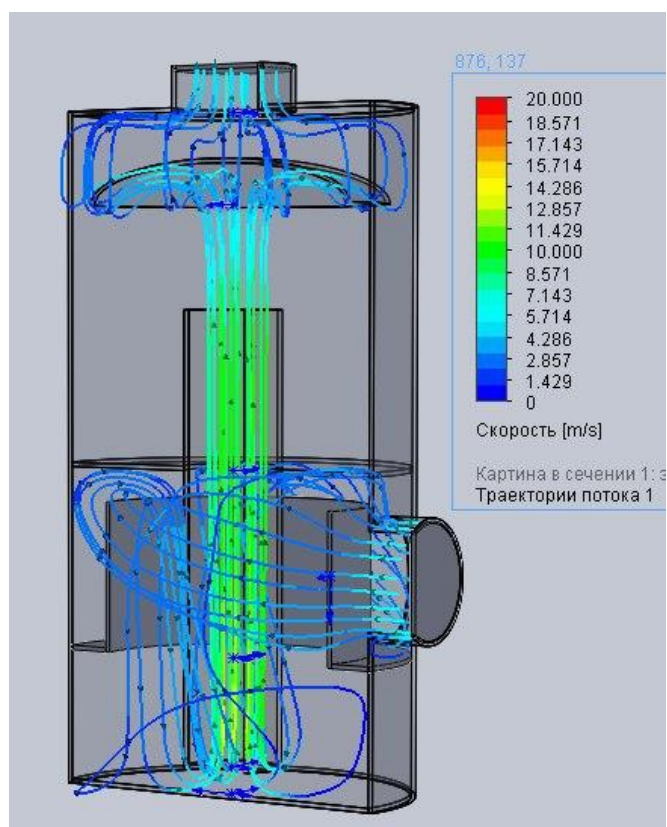


Рисунок 3.4 – Рух повітря в контактному апараті з розподілювачем повітря

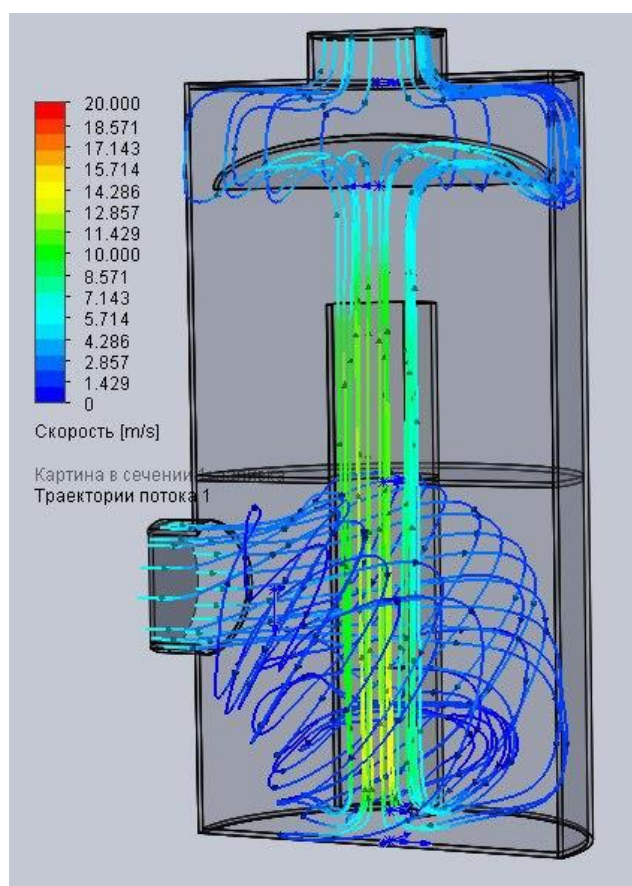


Рисунок 3.5 – Рух повітря в контактному апараті без розподілювача повітря

Для подальшого аналізу було проведено 20 дослідів в програмі Flow Simulation. Для кожного дослідів визначили поле швидкостей.

Для кращої орієнтації в таблиці 3.2 приведено нумерація дослідів для кожного варіанту установки.

Таблиця 3.2 – Нумерація дослідів

№ дослідів	Комплектація досліджуваного апарату	Задана об'ємна витрата повітря, м <sup>3</sup> /с
1	Контактний апарат без розподілювача повітря	0,0064
2		0,00903
3		0,0105
4		0,0118
5		0,0133
6	Контактний апарат з розподілювачем повітря (A=5 мм)	0,0064
7		0,00903
8		0,0105
9		0,0118
10		0,0133
11	Контактний апарат з розподілювачем повітря (A=10 мм)	0,0064
12		0,00903
13		0,0105
14		0,0118
15		0,0133
16	Контактний апарат з розподілювачем повітря (A=15 мм)	0,0064
17		0,00903
18		0,0105
19		0,0118
20		0,0133

На рисунках 3.6 – 3.25 зображено поле швидкостей для кожного дослідів відповідно.

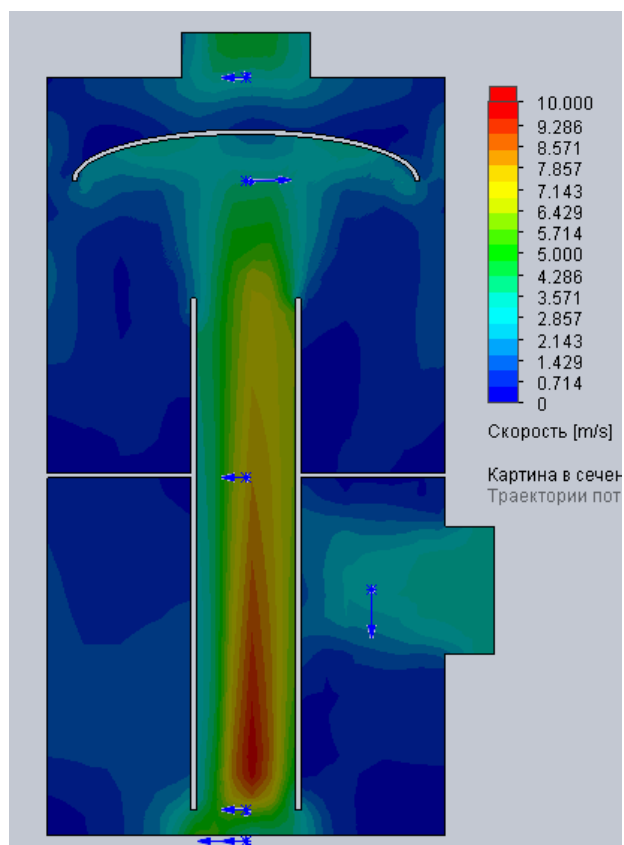


Рисунок 3.6 – Дослід 1

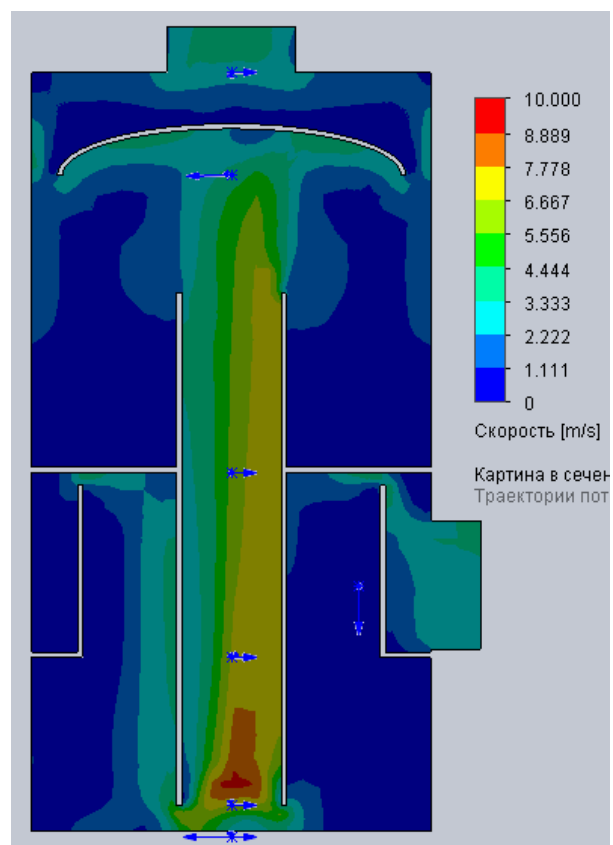


Рисунок 3.7 – Дослід 6

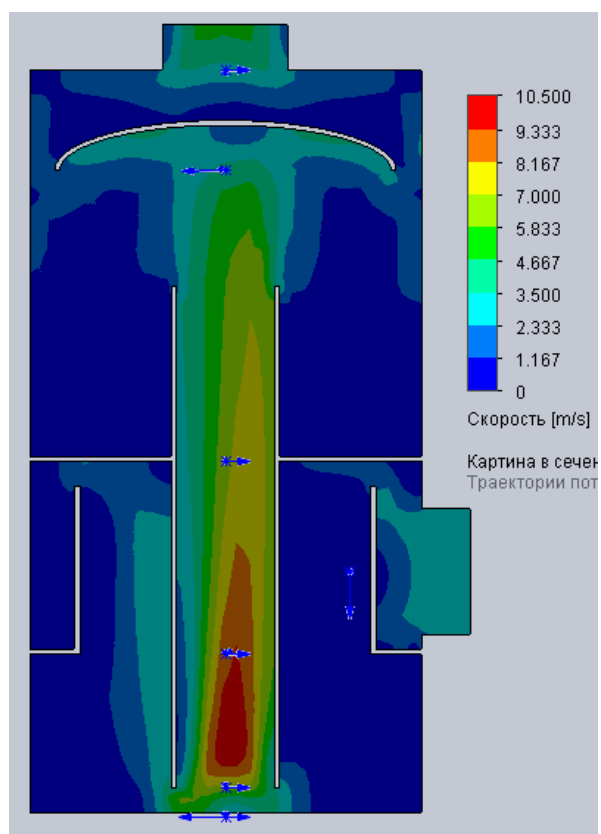


Рисунок 3.8 – Дослід 11

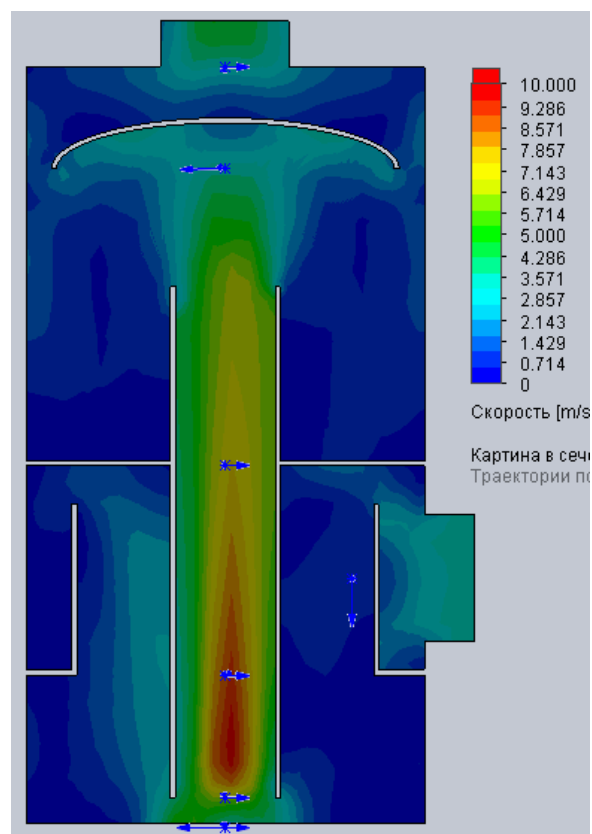


Рисунок 3.9 – Дослід 16

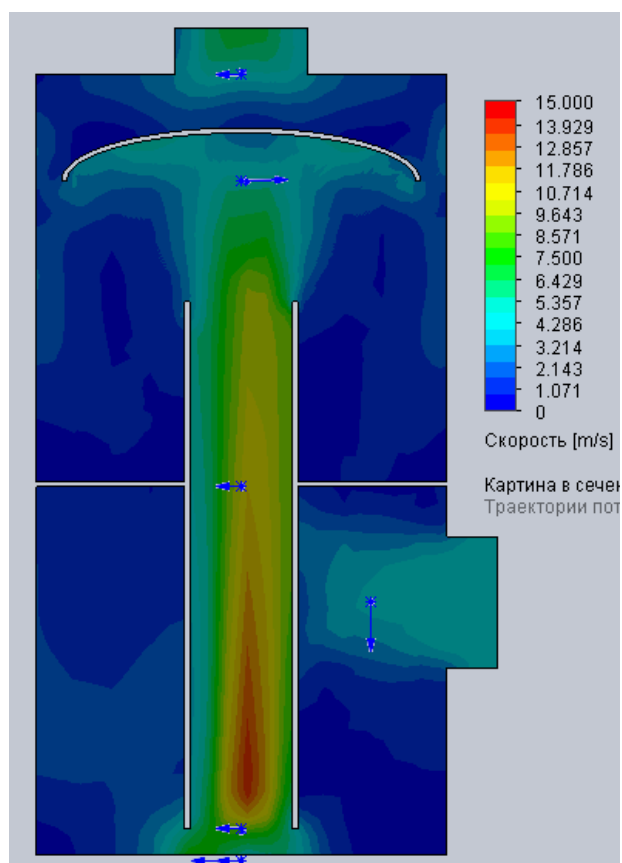


Рисунок 3.10 – Дослід 2

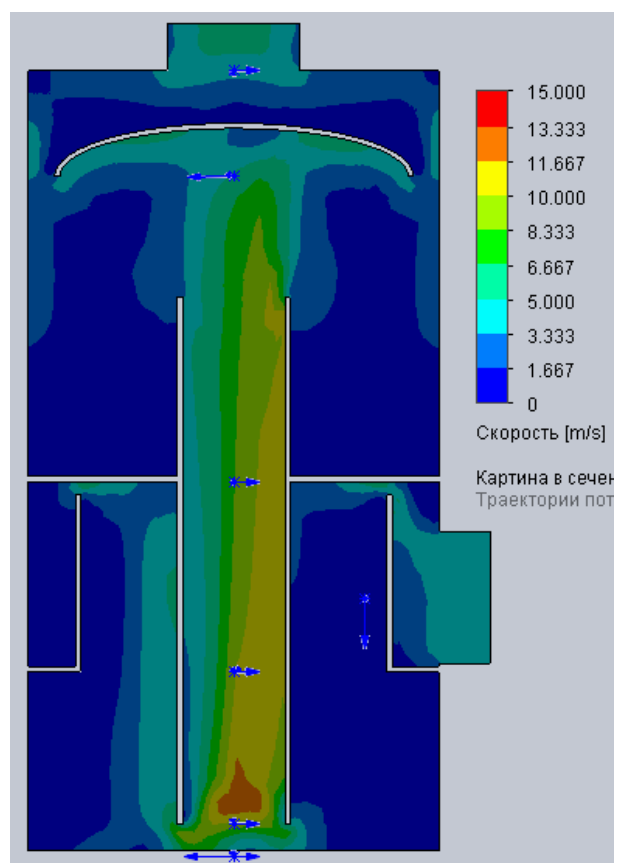


Рисунок 3.11 – Дослід 7

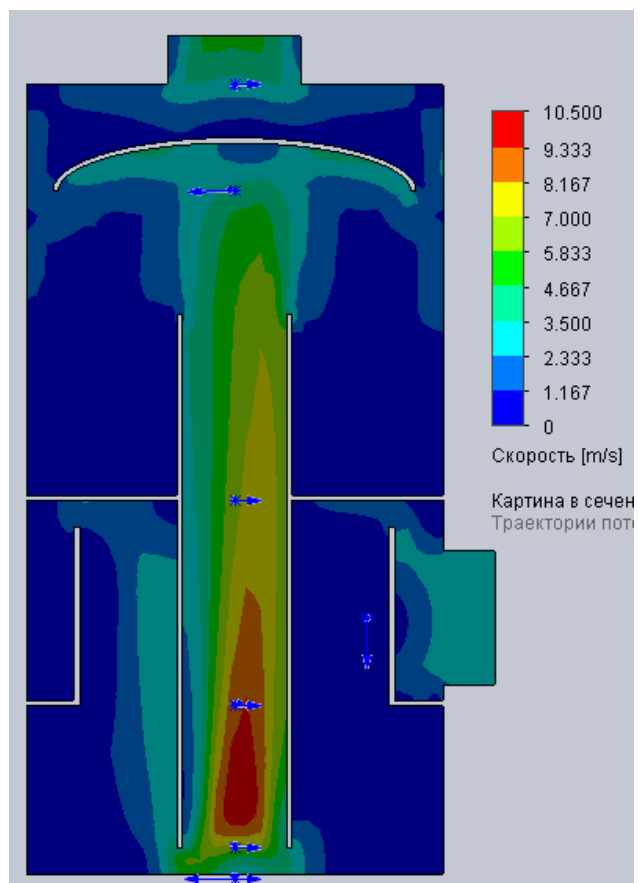


Рисунок 3.12 – Дослід 12

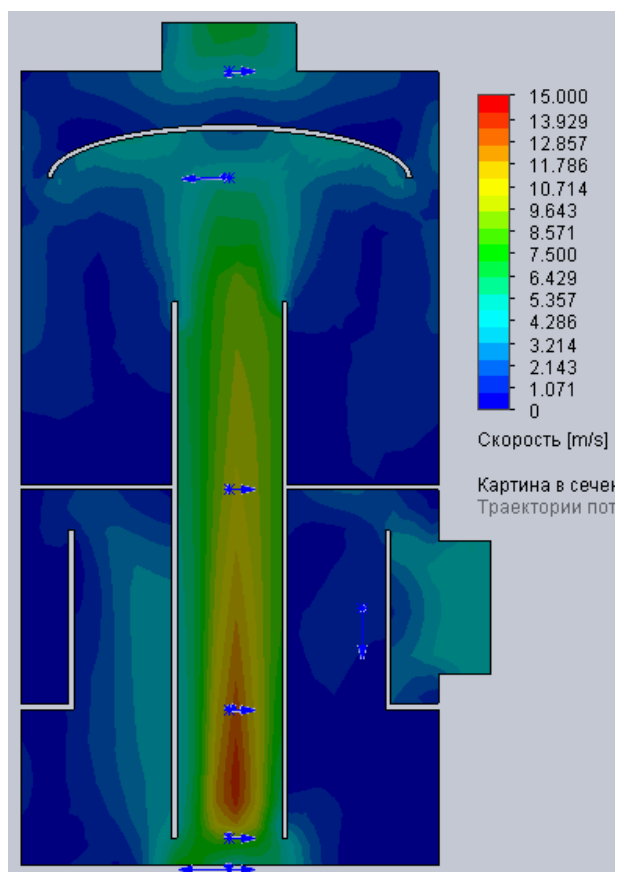


Рисунок 3.13 – Дослід 17

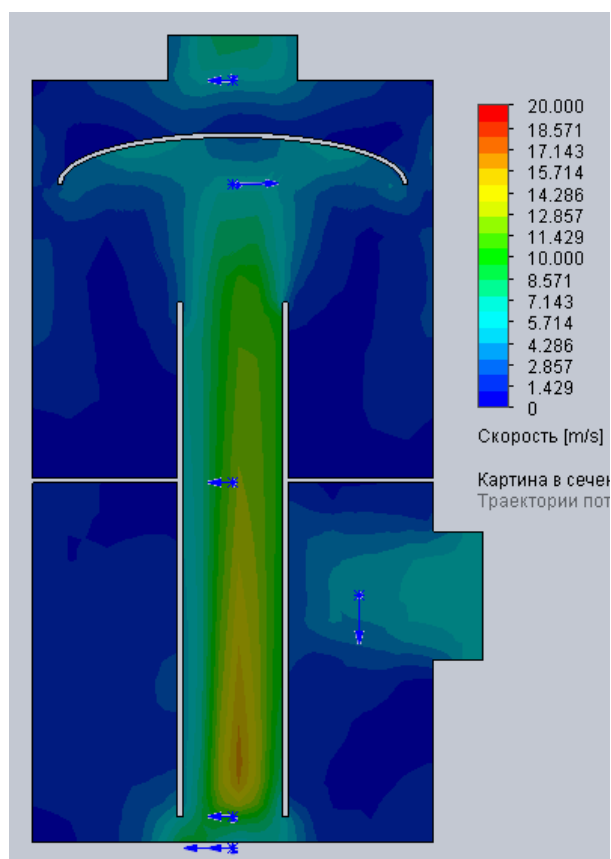


Рисунок 3.14 – Дослід 3

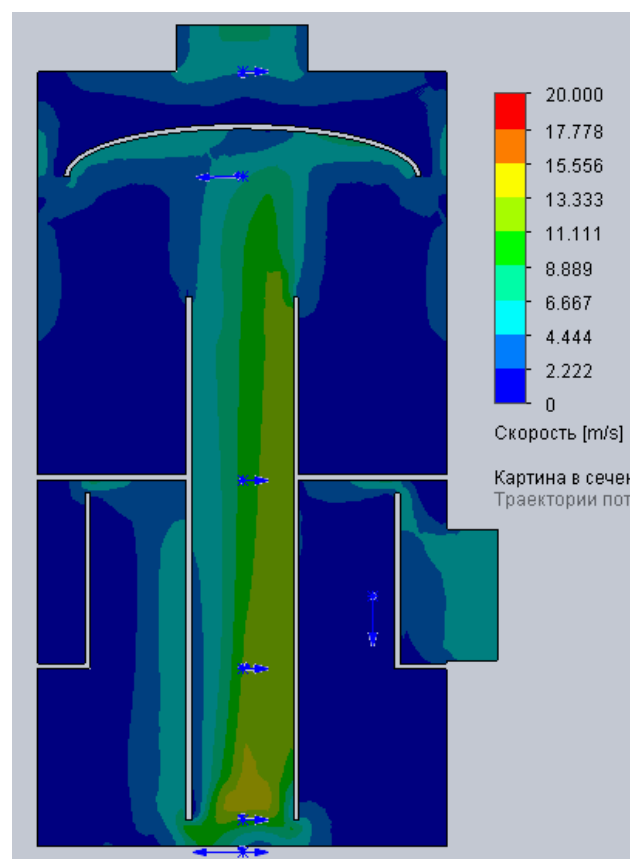


Рисунок 3.15 – Дослід 8

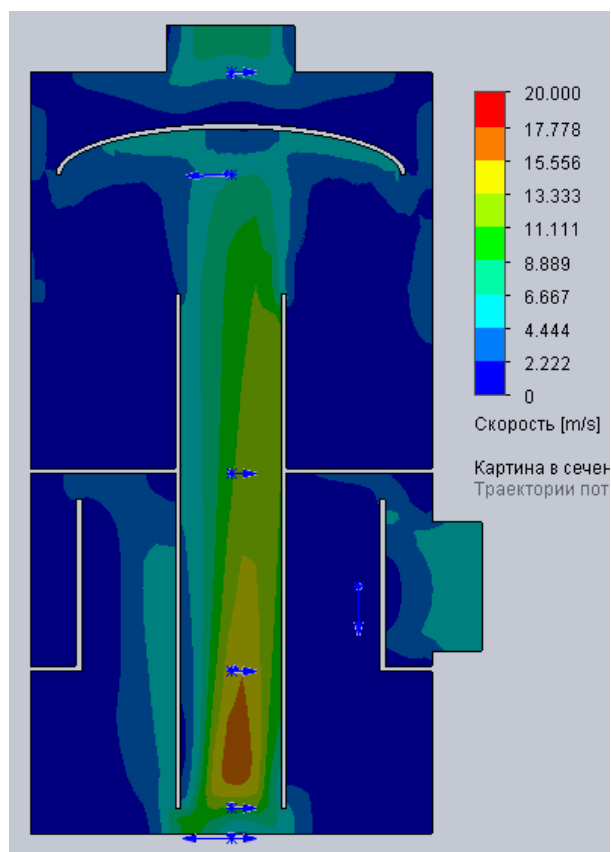


Рисунок 3.16 – Дослід 13

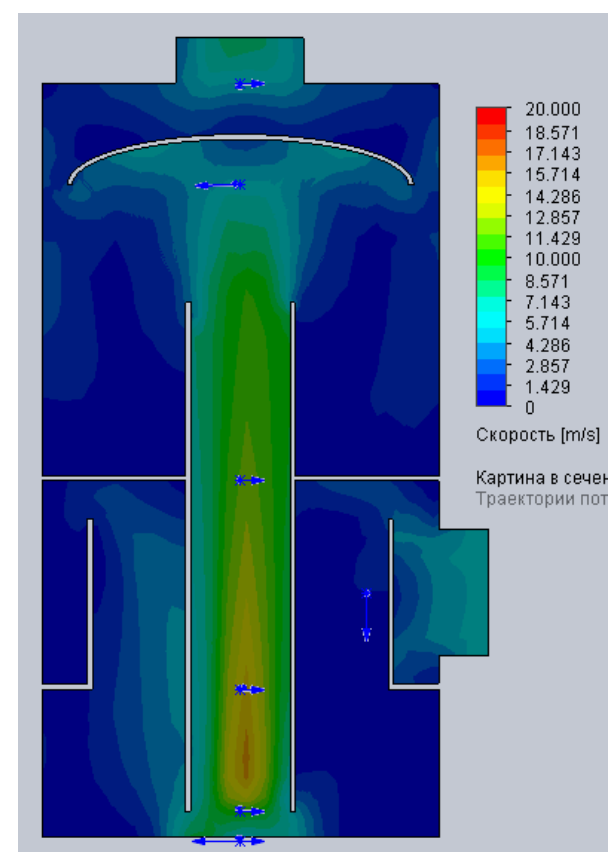


Рисунок 3.17 – Дослід 18

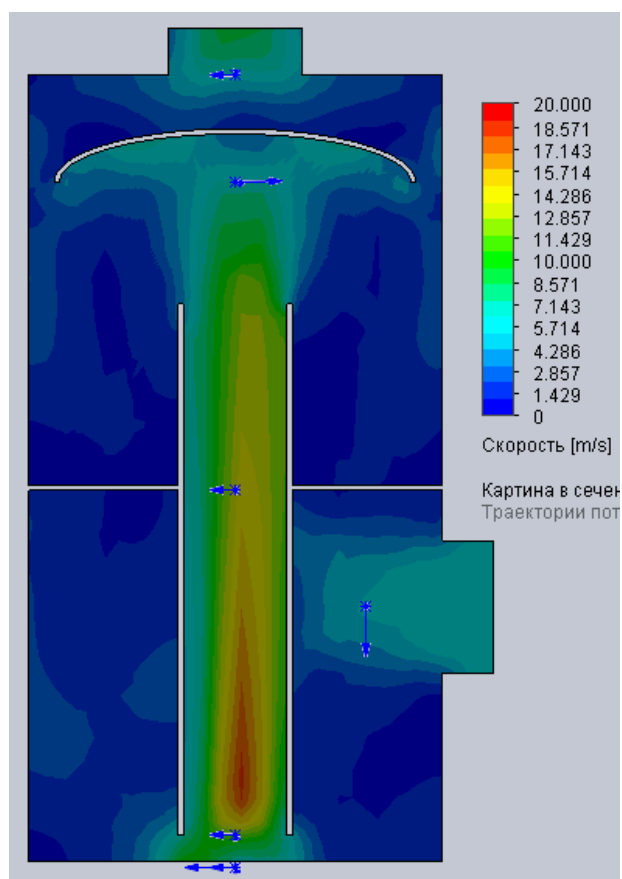


Рисунок 3.18 – Дослід 4

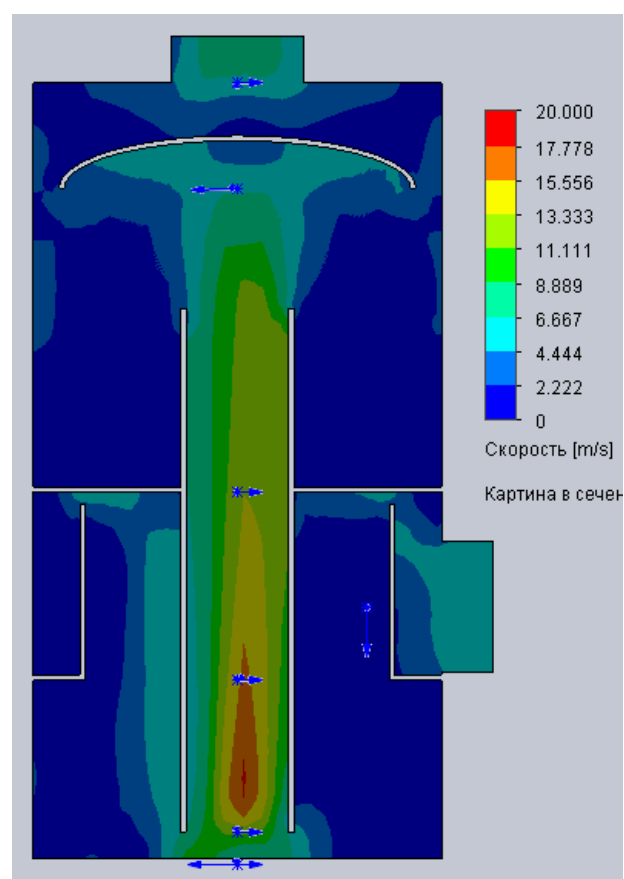


Рисунок 3.19 – Дослід 9

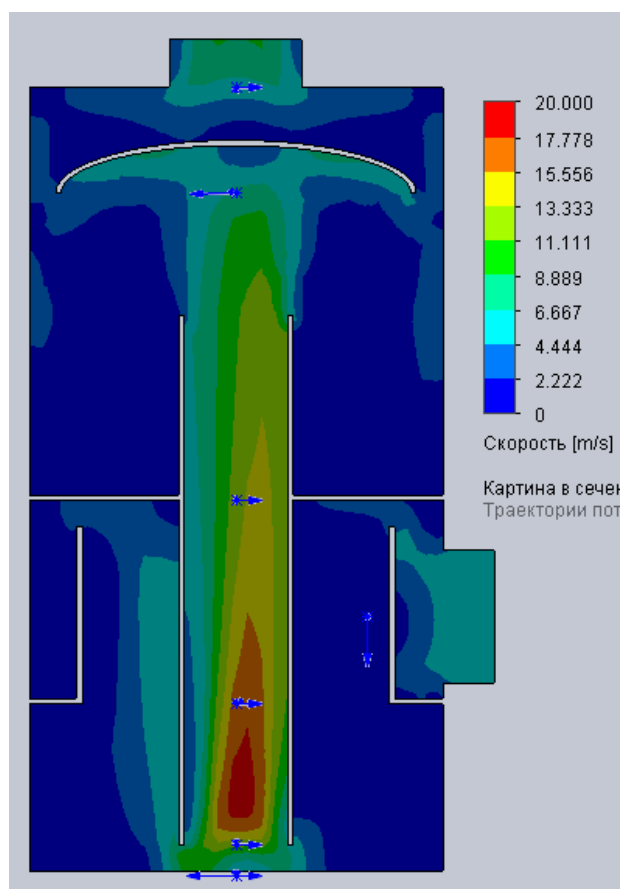


Рисунок 3.20 – Дослід 14

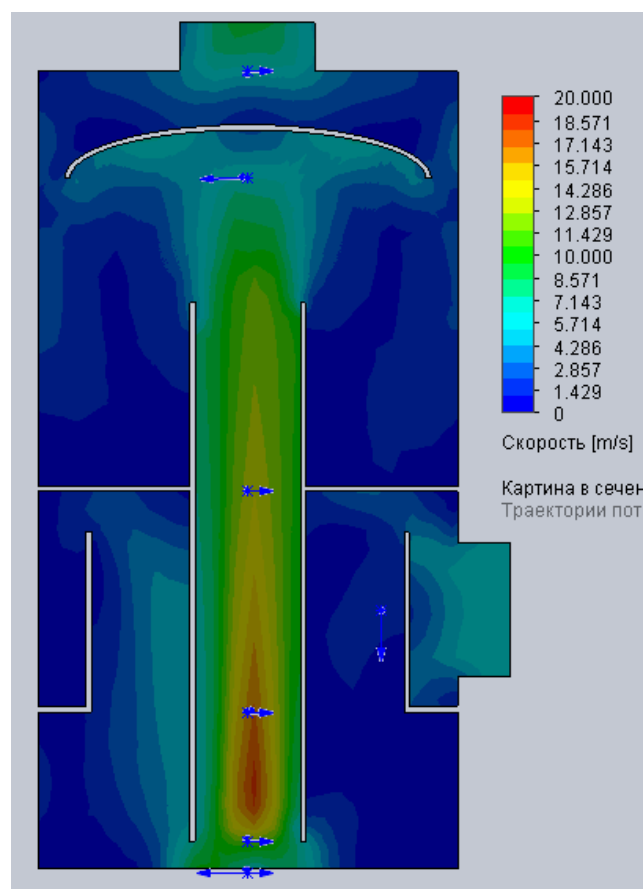


Рисунок 3.21 – Дослід 19

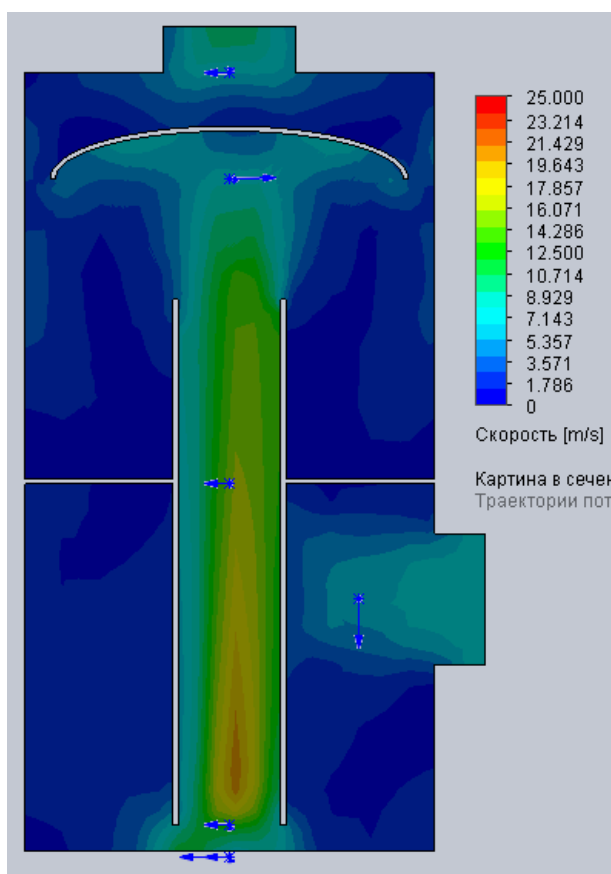


Рисунок 3.22 – Дослід 5

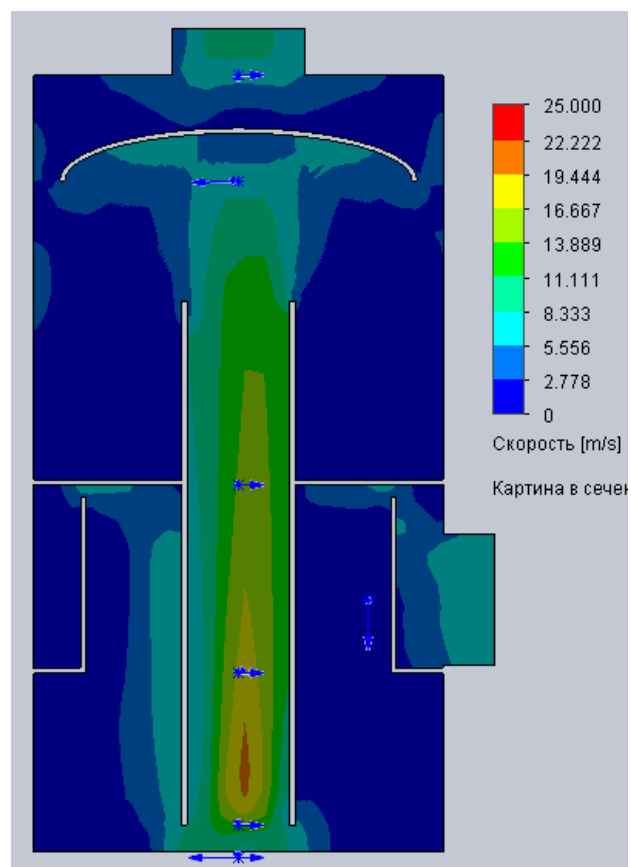


Рисунок 3.23 – Дослід 10

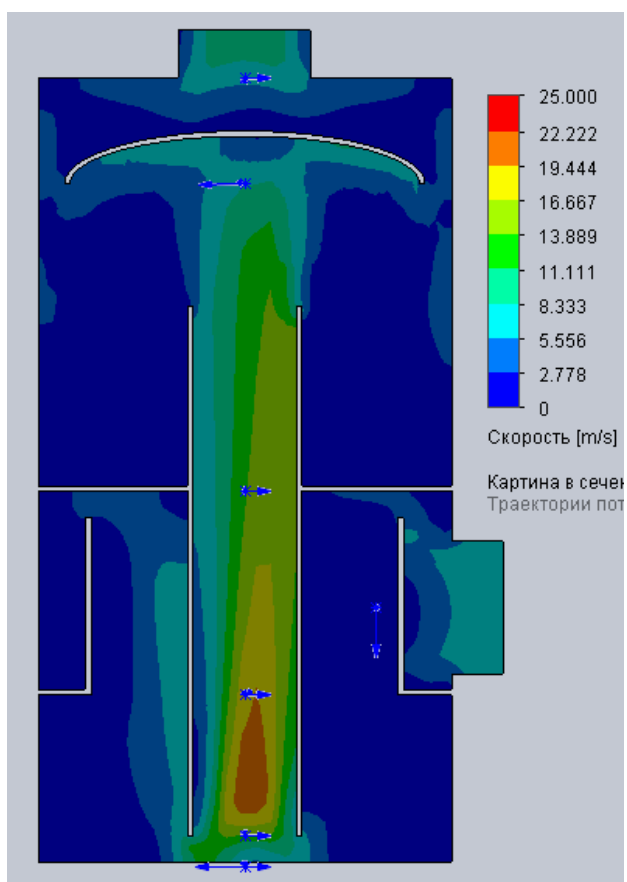


Рисунок 3.24 – Дослід 15

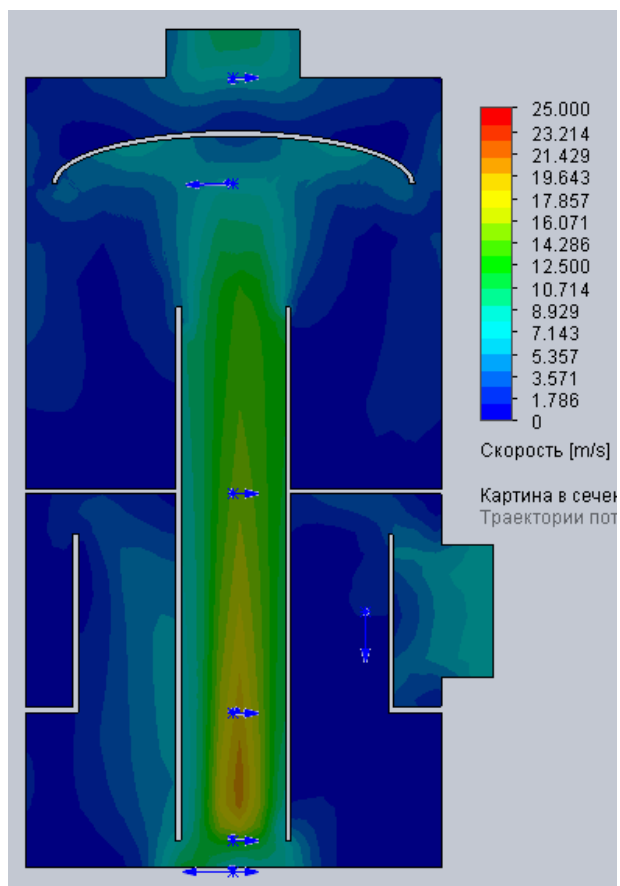


Рисунок 3.25 – Дослід 20

На одній сторінці ми бачимо рисунки результатів дослідів, що проводилися для кожної зазначеної комплектації контактного апарату при однаковій об'ємній витраті повітря. Порівнюючи чотири картинки бачимо, що потік повітря найрівномірніше розподіляється в контактному апараті з розподільувачем повітря, в якому відстань  $A=15$  мм. Видно, що зазори 5 мм і 10 мм, між розподільувачем і перегородкою, недостатні для повноцінного рівномірного входу повітря в камеру апарату.

Розглядаючи результати контактного апарату однакової комплектації, але з різними об'ємними витратами спостерігаємо, що швидкість повітря прямопропорційно зростає зі збільшенням витрат. Найбільше цікавить швидкість повітря в барботажній трубці, відомо, що від її величини залежать режими роботи контактної апарату. Найбільша швидкість виникає в нижній частині труби, і з рухом повітря вгору вона зменшується.

### 3.4 Висновки до розділу 3

За допомогою програми SolidWorks, та допоміжної програми «Flow Simulation» було побудовано трьохвимірну модель досліджуваного контактної апарату та проведено дослід. В результаті було визначено швидкість повітря в контактному апараті, залежність її зміни від об'ємної витрати повітря та від зміни комплектації пристрою. Наглядно показано напрямки руху повітря.

Проаналізувавши отримані результати, можемо зробити наступні висновки:

- найкращим варіантом є контактний апарат з розподільувачем повітря;
- рівномірність руху повітря в камері залежить від відстані між розподільувачем та перегородкою (найкращий варіант коли  $A = 15$  мм);
- швидкість руху повітря залежить від його об'ємної витрати (чим більша витрата-тим більша швидкість).



## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Стартап, як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва, впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів

### 4.1 Резюме проекту

Ідеєю проекту є створення виробництва для виготовлення контактних теплообмінних апаратів плівкового типу з ежекторною подачею рідини в робочу зону. Напрямок діяльності створюваного підприємства – розрахунок та виробництво апаратів, в яких процес тепломасообміну в газорідинній системі проходить в умовах безпосереднього контакту газу та рідини (контактні випарники, контактні охолоджувачі, контактні утилізатори теплоти виробничих газів та парогазових сумішей).

Для реалізації проекту планується створення нового виробництва контактних апаратів з подальшим їх монтажем на підприємствах.

Основними споживачами є підприємства харчової та хімічної промисловості. Наприклад, консервні заводи, молочні фабрики, підприємства з виробництва мінеральних добрив та ін.

Конкурентною перевагою є те, що в Україні діють загальні екологічні норми, які використовуються в Європейському союзі. А контактні теплообмінні апарати з ежекторною подачею рідини в робочу зону на порядок зменшують викиди шкідливих речовин в навколишнє середовище. Вони негабаритні та мають малу матеріалоємність.

Для реалізації проєкту необхідно інвестувати 1306000 грн. Період окупності складає 1,11 роки, а рівень беззбитковості може бути досягнений у перший же рік введення проєкту в експлуатацію.

#### **4.2 Організація проєкту**

Ціль даного проєкту популяризація використання новітніх технологічних рішень, а саме використання апаратів малих габаритів з мінімальними витратами на матеріали, та максимальним зростом енергоефективності установки. Напрямок діяльності створюваного підприємства – розрахунок та виробництво контактних теплообмінників, які призначені для випаровування, охолодження рідини або утилізації теплоти відхідних газів.

Для реалізації проєкту планується створення виробництва установок, для цього передбачається налагодження процесу створення індивідуальних планів, проєктування установок, збір установок в залежності від побажань замовника.

Виробництво буде засновано на виготовленні і застосуванні контактних апаратів, в яких процеси тепломасообміну відбуваються в умовах безпосереднього контакту рідини та газу.

Особливу увагу варто приділити науковим дослідженням, передбаченим проєктом. Дослідження способів подачі рідини в робочу зону контактного апарату, дослідження режимів роботи апарату.

Проект буде являти собою цех або групу цехів приватної власності. Галузева приналежність – промисловість. Для підприємства даний проєкт являється стартапом, оскільки подібні технічні рішення досі не мають широкого застосування в межах нашої країни. Разом з цим проєкт є шляхом оновлення технологій випаровування, охолодження та утилізації теплоти відхідних газів.

#### **4.3 Канва моделі стартап-проект**

У табл. 4.1 зведені основні позиції, з яких формується модель даного стартап-проекту. Кожна позиція окремо розглядається у подальших пунктах даного розділу.

Таблиця 4.1 – Канва моделі стартап-проєкту

<b>КЛЮЧОВІ ПАРТНЕРИ</b> Ключовими партнерами є підприємства, які будуть постачати матеріали, для виготовлення установок. Підрядники, які будуть збирати установки на місці. Конкуруючі та неконкуруючі підприємства, які виготовляють схожу продукцію, а також безпосередні споживачі.	<b>КЛЮЧОВІ ВИДИ ДІЯЛЬНОСТІ</b> Запровадження інноваційної технології подачі рідини в робочу зону контактного апарату, налагодження налагодження ринкових відносин з виробниками. Впровадження у широкий вжиток.	<b>ЦІННІСНІ ПРОПОЗИЦІЇ</b> Збільшення енергоефективності підприємства за рахунок використання вторинних енергоресурсів, як наслідок зменшення грошових затрат. Зменшення викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище, як наслідок покращення екологічних показників.	<b>ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ЗІ СПОЖИВАЧАМИ</b> Кожен споживчий сегмент очікує вигідного та довготривалого використання продукції. Також споживачі сподіваються на покращення екологічних і економічних показників підприємства.	<b>СПОЖИВЧІ СЕГМЕНТИ</b> Підприємства харчової промисловості (консервні заводи, пекарні, молокозаводи, пивоварні та ін.), підприємства хімічної промисловості. Теплоелектроцентралі. Підприємства виробники обладнання і матеріалів.
<b>СТРУКТУРА ВИТРАТ</b> Бізнес модель передбачає інвестиційні та виробничі витрати, з яких придбання устаткування є найбільш дорогим ключовим ресурсом. Найбільших затрат серед ключових видів діяльності вимагає організація діяльності проєкту.		<b>ПОТОКИ НАДХОДЖЕННЯ ДОХОДІВ</b> У проєкті генеруються позитивні потоки доходів ( $NPV = 5621 > 0$ ). Індекс рентабельності інвестицій в проєкт є привабливим і складає $ROI = 4,83 > 1$ .		

#### 4.4 Ключові види діяльності проєкту

##### 4.4.1 Вид проєкту за характером інновації

За характером інновації даний проєкт стосується запровадження нової технології – створення цеху для проєктування та виготовлення контактних теплообмінних апаратів з ежекторною подачею рідини в робочу зону

Що стосується організаційної інновації, то даний стартап проєкт дозволить зменшити використання енергетичних ресурсів підприємства, і як наслідок зменшить викиди шкідливих речовин в атмосферу.

##### 4.4.2 Спрямованість проєкту

Проєкт спрямований на випуск продукції, яка зможе зайняти конкурентоспроможну нішу серед установок, які засновані на принципі ежекторної подачі рідини в робочу зону контактних теплообмінних апаратів.

Спрямований на створення нової технології використання контактних апаратів та способів їх впровадження на підприємствах. Дана технологія дозволяє використовувати апарати в замкнутах системах, що зменшує використання гарячої води і призводить до зменшення витрат енергії.

Дозволить поліпшити стан стану навколишнього середовища (скорочення викидів шкідливих речовин) за рахунок зменшення об'ємів палива, що спалюється.

##### 4.4.3 Висновок щодо науково-технічного рівня ідеї

Дана технологія краща за існуючі в Україні аналоги за основними показниками (аналогічні компанії не надають готових комплексних рішень з використанням контактних теплообмінних апаратів, використання вторинних енергоресурсів дозволить знизити витрати енергії та покращить економічну ситуацію промислових підприємств);

##### 4.4.4 Основні бізнес-процеси проєкту

Основні процеси, що входять до стартап-проєкту, наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні процеси стартап-проекту

Група процесів	Бізнес-процес	Ступінь опрацювання бізнес-процесу	
		є реалізованим	буде реалізованим
Розробка продукції	розробка та конструювання продукції		+
	розробка і конструювання процесу	+	
	технологічна підготовка виробництва		+
Вимоги споживачів	дослідження розвитку ринку	+	
	організація маркетингу і продажів		+
Виконання замовлень	забезпечення і матеріальнотехнічний збут		+
	планування і управління виробництвом		+
	виробництво продукції		+
Обслуговування споживача	післяпродажне обслуговування		+
	повернення продукції		+

#### 4.5 Ціннісні пропозиції та споживачі

Ціннісна пропозиція – сукупність переваг, які проект може запропонувати споживачу.

##### 4.5.1 Зміст ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї стартап-проекту подано у вигляді табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Зміст ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Сегменти споживачів	Цінність для споживачів
Створення виробництва контактних теплообмінних апаратів, які використовуються в якості випарників, систем охолодження, концентраторів, градирень, утилізаторів теплоти .відхідних газів	1. Виробництво установок, які використовують вторинні енергоресурси і зменшують використання палива.	Багатопрофільне підприємство	Зменшення плати за енергоресурси, вдосконалення та пришвидшення роботи уже існуючих систем
	2. Зменшення кількості викидів в атмосферу, що забезпечує кращу екологічну ситуація в країні.	Багатосторонні платформи	Дотримання екологічних норм

## 4.5.2 Аналіз ідеї проєкту

Аналіз ідеї стартап-проєкту наводиться в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Аналіз ідеї стартап-проєкту

<b>Технікоекономічні характеристики ідеї</b>	<b>Продукція</b>	<b>W (слабка сторона)</b>	<b>N (нейтральна сторона)</b>	<b>S (сильна сторона)</b>
Розташування	Близьке	--	--	Відсутність проблем з транспортуванням
Екологічність систем	Висока	--	--	Зменшення викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище
Використання вторинних енергоресурсів в	+	--	Для досягнення ефекту необхідний значний об'єм ВЕР	Зменшення витрат на систему теплопостачання
Вид продукції	Збірні конструкції	--	--	Індивідуальний підхід до кожного замовника
Якість	Висока	--	--	Визначено за результатами попереднього аналізу
Ціна	37500 грн одна установка	Ціна досить висока	--	Доставка зібраної конструкції Установка, проектування, післямонтажне обслуговування змінює ставлення до ціни продукції
Доля ринку	20% (визначено за попереднім аналізом)	На етапі становлення доля ринку буде низькою	--	--

#### 4.5.3. Технологічний аудит ідеї проєкту

Технологічний аудит ідеї стартап-проєкту наведений в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Проектування конкретної установки під потреби	У залежності від потреб може бути змінена форма, деякі габаритні розміри	Технології розроблені конкретно для даної компанії	Розроблена; є інтелектуальною власністю компанії
Замовлення необхідний комплектуючих для збору установки, збірка установки	Комплектуючі різного виду доставляються в цех, де буде виконано процес збірки.		
Обслуговування після встановлення протягом гарантійного терміну, що складає 5 років	Гарантійне обслуговування залежить від якості матеріалів установки, що в свою чергу залежить від ціни, яку готовий заплатити замовник.		
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: методи, що будуть використані в проєкті будуть реалізовані за рахунок технологій, розроблених для конкретних випадків. Дана технологія є доступною через розробку її всередині компанії.			

#### 4.5.5 SWOT-аналіз проєкту

Аналіз сильних та слабких сторін, а також можливостей і загроз, стартап-проєкту зведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

1	2
<b>Сильні сторони (S):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- відсутність проблем з транспортуванням збірних матеріалів</li> <li>- процес збірки не займає багато часу;</li> <li>- висока якість матеріалів, які використовуються для виготовлення установок;</li> <li>- супроводження проєкту та гарантійне обслуговування протягом 5 років нівелює високу ціну продукції.</li> </ul>	<b>Слабкі сторони (W):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ціна є досить високою;</li> <li>- на етапі становлення доля ринку буде низькою відсутність розрахунків та знань;</li> <li>- необхідне вкладення ресурсів в навчання спеціалістів, які будуть займатися проектування установок.</li> </ul>

Продовження таблиці 4.6

1	2
<b>Можливості (О):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- надання конкурентноспроможних послуг;</li> <li>- збільшення загального показника енергоефективності;</li> <li>- залучення закордонних інвесторів для створення дослідних центрів;</li> <li>- створення інноваційних технологій у даній сфері, їх патентування.</li> </ul>	<b>Загрози (Т):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- неспівпадіння розрахованих даних з такими ж в реальних умовах;</li> <li>- високий поріг при виході на ринок;</li> <li>- новизна технології;</li> <li>- збільшення затрат на освоєння, зниження об'ємів виробництва.</li> </ul>

#### 4.6 Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту

Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту даного стартап-проєкту зведено в загальну табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Взаємовідносини зі споживачами та канали збуту

Сегмент споживачів	Особливості поведінки	Вимоги споживачів	Канали збуту	Інші аспекти взаємовідносин
Підприємства харчової промисловості (консервні заводи, пекарні, молокозаводи, пивоварні та ін.), підприємства хімічної промисловості. Теплоелектроцентралі.	Є доступними лиш для певного напрямку підприємств.	Якість, цінність продукції, як інтелектуально цінної, практичне покращення економічних показників.	Канали збуту першого рівня.	Споживачі можуть не згодитись переходити на нові, маловідомі для них, технології.

#### 4.7 Обґрунтування ресурсів та витрат проєкту

Обґрунтування ресурсів та витрат проєкту наведено в табл. 4.8 – 4.12.

Таблиця 4.8 – Визначення ціни

Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на продукцію	Розрахункова ціна продукції
53700 грн	55000 грн	1200000 грн/міс	50500- 60700 грн/шт	57500 грн/шт



Таблиця 4.9 – Визначення обсягу виробництва продукції

Показник	Значення по роках			
	2019	2020	2021	2022
Загальна потреба в продукції (од/рік)	20	30	45	60
Можливі річні обсяги випуску в натуральних показниках (од/рік)	20	30	45	60
Ціна одиниці продукції (грн/шт)	57500	57500	57500	57500
Річні обсяги випуску в вартісних показниках (тис. грн.)	1150	2470	4100	5320

Таблиця 4.10 – Розрахунок загальних початкових інвестиційних витрат

Назва етапу	Строки виконання	Обсяги фінансування, тис.грн.
Проведення досліджень	4 місяці	100
Придбання устаткування	2 місяці	45
Організація діяльності та запуск проекту	2 місяці	65
Витрати на управління	1 місяць	20
Початкові виробничі витрати	1 місяць	60
Інші витрати	--	10
Разом	10 місяців	300

Таблиця 4.11 – Розрахунок виробничих витрат

Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.			
	2019	2020	2021	2022
Загальногосподарські витрати	456	590	704	714
витрати на оренду та утримання приміщень, обладнання	300	400	500	500
комунальні витрати	96	120	145	145
витрати на збут, просування та рекламу	60	70	60	50
Витрати на матеріальні ресурси (комплектуючі, сировина)	240	320	440	520
Витрати на оплату праці	300	360	480	600
Інші	10	10	15	15
Разом	1006	1280	1640	1850

Таблиця 4.12 – Розрахунок загальних витрат на реалізацію стартап-проєкту за роками

Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.				Разом
	2019	2020	2021	2022	
Інвестиційні витрати	300	250	250	250	1050
Виробничі витрати	1006	1280	1640	1850	5776
Обсяг загальних витрат, в тому числі за рахунок	1306	1530	1890	2100	6826
власних коштів	--	300	1500	2100	3900
коштів інвестора	1306	1230	390	--	2926

#### 4.8 План робіт та партнери стартап-проєкту

План поставлених робіт, а також партнери, що будуть залучені до стартап-проєкту, наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – План робіт та партнери стартап-проєкту

Бізнес-процес проєкту	Термін виконання	Виконавець, співвиконавці	Результат
1	2	3	4
Розробка та конструювання продукції	5 місяців	Спільні підприємства для запуску проєктів	Розроблений вид продукції
Розробка і конструювання процесу		Спільні підприємства для запуску проєктів	Розроблений процес виготовлення продукції
Технологічна підготовка виробництва		Спільні підприємства для запуску проєктів	Підготовлене виробництво
Дослідження розвитку ринку	2 місяці	Спільні підприємства для запуску проєктів	Результати ринкових досліджень
Організація маркетингу і продажів	2 місяці	Співробітництво між неконкуруючими компаніями	Рекламна кампанія, угоди зі споживачами
Забезпечення і матеріальнотехнічний збут	1 місяць	Спроектований комплекс контактних установок, партнерство між конкурентами	Угоди з постачальниками відходів

Продовження таблиці 4.13

1	2	3	5
Планування і управління виробництвом	1 місяць	Спроектований комплекс контактних установок	Налагодження виробництва контактних теплообмінних апаратів
Виробництво продукції	1 місяць	Спроектований комплекс контактних установок	Стабільність процесу вироблення продукції
Післяпродажне обслуговування	1 місяць	Відносини виробника зі споживачами	Узгодження умов обслуговування зі споживачами
Повернення продукції	1 місяць	Відносини виробника зі споживачами	Узгодження умов якості втор

#### 4.9 Грошовий потік та економічна оцінка стартап-проєкту

##### 4.9.1. Визначення крапки беззбитковості проєкту

Крапка беззбитковості відображає обсяг виробництва інноваційної продукції, при досягненні якого виручка від реалізації покриває сумарні витрати на її виробництво. Розрахунок точки беззбитковості проводиться за формулою:

$$T = \frac{C}{P - V} \quad (4.1)$$

де  $C$  – постійні витрати на весь обсяг продукції (ті, які не залежать від обсягу виробництва продукції – загальногосподарські витрати та витрати на оплату праці, визначені в табл. 4.11);

$P$  – ціна одиниці продукції;

$V$  – змінні витрати на одиницю продукції (ті, які пропорційно залежать від обсягу виробництва продукції – витрати на матеріальні ресурси, визначені в табл. 4.11).

Результати визначення крапки беззбитковості проєкту зведено в табл. 4.14

Таблиця 4.14 – Визначення крапки беззбитковості проєкту

Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.			
	2019	2020	2021	2022
1	2	3	4	5
Загальногосподарські витрати	456	590	704	714

Продовження табл. 4.14

1	2	3	4	5
Витрати на оплату праці	300	360	480	600
Постійні витрати на весь обсяг продукції (C)	1006	1280	1640	1850
Ціна одиниці продукції (P), грн/шт	57,5	57,5	57,5	57,5
Витрати на матеріальні ресурси (комплектуючі, сировина)	240	320	440	520
Змінні витрати на одиницю продукції (V), грн/кг	0,5	0,51	0,63	0,7
Точка беззбитковості, од	17	22	29	32

Рівень беззбитковості за проектом може бути досягнений у перший же рік введення проекту в дію.

#### 4.9.2 Формування грошового потоку від реалізації проекту

Чистий дисконтований дохід (NPV, Net Present Value) – це різниця між надходженнями за весь період інноваційного проекту та інвестиціями в проект.

Таблиця 4.15 – Формування грошового потоку від реалізації проекту

Показник	Значення по роках				Разом
	2019	2020	2021	2022	
Надходження від проекту (виручка від реалізації продукції, послуг – див. 2 п. 5.7) (D)	1150	2470	4100	5320	13040
Загальні витрати (див. 5 п. 5.7) (I), в тому числі	1306	1530	1890	2100	6826
Грошовий потік ( $3 = 1 - 2$ ) (CF)	-156	940	2210	3220	4640
Акумуляований грошовий потік (ACF)	-1462	-590	320	1120	--

$NPV = 4640 > 0$  протягом розрахункового періоду – інноваційний проект доцільно прийняти.

#### 4.9.3 Період окупності інвестицій

Розрахунковий термін від початку реалізації проєкту, починаючи з якої акумульований грошовий потік ( $ACF$ ) приймає стійке позитивне значення. Іншими словами, це – період, починаючи з якого первинні вкладення і інші витрати, пов'язані з інвестиційним проєктом, покриваються сумарними результатами його здійснення. Термін окупності розраховується за формулою:

$$T = t + \frac{|ACF_{t-}|}{|ACF_{t-}| - |ACF_{t+}|} \quad (4.2)$$

де  $t$  – останній період реалізації проєкту, за якого акумульований грошовий потік (різниця накопиченого доходу і витрат) приймає від'ємне значення ( $ACF$  – див. рядок 4 в табл. 5.15) – у формулі зазначається порядковий номер періоду від початку фінансування);

$ACF_{t-}$  – це остання від'ємна різниця накопиченого доходу та витрат (грн.);

$ACF_{t+}$  – це перша позитивна різниця накопиченого доходу та витрат (грн.).

$$T = 1 + \frac{|590|}{|590| - |1120|} = 1,11 \quad (4.3)$$

Отже, визначено, що період окупності інвестицій складає 1,11 років.

#### 4.10 Висновки до розділу 4

За розглянутими пунктами можна побачити, що даний проєкт є прибутковим, а найголовніше, – можливим рішенням для зменшення кількості викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. Прикладним позитивним фактором є те, що споживачі покращують енергоефективність підприємств. Для реалізації проєкту необхідно інвестувати 1,306 млн. грн. Період окупності інвестиційних відрахувань складає всього 1,11 років, а рівень беззбитковості за проєктом може бути досягнений у перший же рік введення проєкту в дію. Дана технологія є інноваційною не тільки для нашої країни, і її впровадження дозволить покращити екологічну ситуацію. Впровадження проєкту дозволить в подальшому знизити витрати палива, використовуючи вторинні енергоресурси.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації були розглянуті шляхи підвищення енергоефективності промислових підприємств за рахунок встановлення контактних плівкових апаратів. У результаті було розроблено нову схему контактного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону. Досліджуваний апарат має широкий спектр застосування і може використовуватися в якості: контактних випарників різних розчинів і водонагрівачів, контактних утилізаторів теплоти відхідних газів і парогазових сумішей з конденсацією наявного в них пара, плівкових охолоджувачів води (градирень), плівкових охолоджувачів і осушувачів повітря.

Актуальність даної роботи полягає в тому, що в ній пропонуються нові технічні рішення, які цілком задовольняють поставлені задачі: збільшення енергоефективності підприємств, покращення екологічного стану навколишнього середовища, зменшення витрат на установки. В наш час все більше уваги приділяється енергозберігаючим технологіям, які можуть утилізувати теплоту відхідних газів, тим самим зменшуючи витрати енергоресурсів. Контактні плівкові апарати в наш час набувають популярності серед промислових підприємств, і тому їх поглиблене дослідження є перспективним.

У роботі розроблена спрощена 3D модель досліджуваної установки в програмному забезпеченні SolidWorks. Змодельовано декілька комплектацій контактного апарату та обрано найбільш ефективну. Отримано розподіл швидкостей повітря в барботажній трубі апарату, та показано як він залежить від об'ємної витрати повітря.

Задля визначення теоретичних засад ефективного використання контактного плівкового апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону було проведено детальний гідродинамічний та тепломасообмінний аналізи. Зроблені наступні висновки:

1. Контактні теплообмінні апарати менш поширені ніж поверхневі, але мають значні переваги: висока інтенсивність процесів теплообміну, істотне зменшення корозії обладнання, виключення можливості відкладень на поверхнях нагріву, можливість підвищення температурного рівня технологічних процесів, простота конструкції і зниження витрат дефіцитних матеріалів і відповідно матеріальних витрат; відсутність розподільчої поверхні дозволяє використовувати в якості теплоносіїв забруднені і агресивні гази, рідини, висококонцентровані розчини та ін.

2. Запропонований інжекційний спосіб подачі рідкої фази в газовий потік дозволяє за рахунок зміни зазору між обрізом труби і дзеркалом рідини реалізувати різні режими течії при швидкостях менших швидкості захлинання, що має місце в апаратах традиційної конструкції. Простота запропонованого способу організації контактного теплообміну і можливість

забезпечення необхідного режиму дає перспективу його використання в контактних апаратах систем утилізації теплоти відхідних газів, різноманітних зволожувачах та інших установках енергетичного обладнання.

3. Використання схеми із розподільовачем повітря, при нижньому підведенні та верхньому відведенні забезпечує рівномірний розподіл температури та швидкості повітря у досліджуваній установці.

4. Аналіз розрахунків доводить, що процес теплообміну між повітрям і рідиною є ефективним, що свідчить про доцільність використання саме такої конструкції контактного теплообмінника.

5. Збільшення продуктивності контактних газорідинних апаратів плівкового типу досягається в разі реалізації в них супутного руху плівки рідини і потоку газу, що досягається завдяки оригінальному підводу рідкої фази, описаному в дипломній роботі.

6. Результати експериментальних досліджень масовіддачі в запропонованому контактному апараті узагальнені емпіричною залежністю, ридатною для інженерних розрахунків.

Результати досліджень можуть бути використані для проектування та подальшого дослідження аналогічних контактних апаратів, а також розробки та впровадження таких установок в якості обладнання для промислових підприємств (утилізатори теплоти відхідних газів, випарники, охолоджувачі), для збільшення енергоефективності виробництв та зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Василенко С.М. Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору: курс лекцій : навч. посіб. для студ. ВНЗ / С.М. Василенко, В.В. Шутюк. – К.: УДУХТ, 2000. - 36 с.
2. Дані з Інтернет ресурсу: <https://studopedia.info/6-26264.html>.
3. Басова Н.М. Тепломасообмін. Тексти лекцій / Н.М. Басова, В. І. Романтовський. –Х.: ХДТУБА, 2006. – 102с.
4. Дані з Інтернет ресурсу (сайт «Основи теплотехніки та гідравліки»): <https://sites.google.com/site/osnoviteplotekhnikitagidravliki/home>.
5. Vallario R. W. STATE OF TECHNOLOGY OF DIRECT CONTACT HEAT EXCHANGING/ R. W. Vallario, D. E. DeBellis. – May 1984, Los Angeles, California. pp. 107-111.
6. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах / Е.И. Андреев. – Л.: Энергоатомиздат., 1985. – 192 с.
7. Hewitt G. F. Annular Two-Phase Flow / G. F. Hewitt, N. S. Hall-Taylor. – Oxford, New York: Pergamon Press, 1970. – P. 49
8. Dukler A.E. Flooding and upward film flow in tubes / A. E. Dukler, L. P. Smith, A. A. Chopra // I. Experimental studies. Int. J. Multiphase Flow. – 1984. – Vol. 10. – P. 585–597.
9. Ghosh S.D. Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas–liquid two-phase flow / S. D. Ghosh, D. K. Pratihari, P. K. Das // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 84. – P. 417–436.
10. Ghosh S. D. Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions / S. D. Ghosh, D. K. Pratihari, P. K. Das // Int. J. Multiphase Flow. – 2013. – Vol. 52. – P. 102–120.
11. Govan A. H. Flooding and churn flow in vertical pipes / A. H. Govan, G. F. Hewitt, H. J. Richter // Int. J. Multiphase Flow. – 1991. – Vol. 17. – P. 27–44.
12. Jayanti S.K. Theoretical investigation of the diameter effect on flooding in countercurrent flow / S. K. Jayanti, A. H. Tokarz, G. F. Hewitt // Int. J. Multiphase Flow. – 1996. – Vol. 22. – P. 307–324.
13. Suzuki S.B. Behaviour of liquid films and flooding in counter-current two-phase flow / S.B. Suzuki, T. P. Ueda // Part 1. Flow in circular tubes. Int. J. Multiphase Flow. – 1977. – Vol. 3, Issue 6. – P. 517–532.
14. Fowler A.C. Flooding and flow reversal in annular two-phase flows / A. C. Fowler, P. E. Lissner // Applied Mathematics. – 1992. – Vol. 52, No. 1. – P. 15–33.



15. Moalen Maron D., Dukler A. E. Flooding and upward film flow in vertical tubes - II. Speculations on film flow mechanisms / D. Moalen Maron, A. E. Dukler // *Int. J. Multiphase Flow.* – 1984. – Vol. 10, Issue 5. – P. 599–621.
16. Cetinbudaklar A. G. The mechanism of flooding in vertical counter-current two-phase flow / A. G. Cetinbudaklar, G. J. Jameson // *Chem. Eng. Sci.* – 1969. – Vol. 24. – P. 1669–1680.
17. Chang Hsueh-Chia. Nonlinear waves on liquid film surfaces — I. Flooding in a vertical tube / Hsueh-Chia Chang // *Chem. Eng. Sci.* – 1986. – Vol. 41, No. 10. – P. 2463–2476.
18. Yamaguchi K. B. Characteristics of counter current gas-liquid two-phase flow in vertical tubes / Yamaguchi K. B., Yamazaki Y. P. // *Journal of Nuclear Science and Technology.* – 1982. – Vol. 19, No. 12. – P. 985–996.
19. The effects of surface tension on flooding in counter-current two-phase flow in an inclined tube / M. Deendarlianto, A. Ousaka, A. Kariyasaki, D. Lucas, K. Vierow, C. Vallee, K. Hogan // *Experimental Thermal and Fluid Science.* – 2010. No. 34. – P. 813–826.
20. Безродный М. К. Гидродинамика и контактный теплообмен в газожидкостных системах / М. К. Безродный, П. А. Барабаш, Н. Н. Голяяд. – Киев: НТУУ "КПИ им. Игоря Сикорского", Изд-во "Политехника", 2017. – 187 с.
21. Патент на корисну модель 121684 UA, F28C 3/06. Контактний теплообмінник / П.О. Барабаш, А.С. Соломаха, П.П. Куделя, О.О. Панченко; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – № u201706750; заявл. 29.06.2017; опубл. 11.12.2017. Бюл. № 23. – 4 с.
22. Соснин. Ю. П. Контактные водонагреватели / Ю.П. Соснин. – Москва, Стройиздат. – 1974. – 359 с.
23. Корнеев А.Д. Патент на полезную модель 2341747 RU, F28D. Пленочный теплообменный аппарат / А.Д. Корнеев ; заявитель и патентообладатель Корнеев Александр Дмитриевич. – № 2007120637/06; заявл. 04.06.2007; опубл. 20.12.2008. Бюл. № 35. – 3 с.
24. Безродный М.К. Гидродинамика и контактный тепломассообмен в некоторых газожидкостных системах: монография / М.К. Безродный, П.А. Барабаш, Н.Н. Голяяд. – К.: НТУУ «КПИ», 2011. – 408 с.
25. Капица П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П.Л. Капица // *Журн. exper. и теоретич. Физики.* – 1948. – № 18, вып. 1. – 28 с.
26. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – Москва, Машиностроение. – 1992. – 534 с.
27. Пенный режим и пенные аппараты / Э.Я. Тарат и др. – Л: Химия. – 1977. – 304 с.

## Додаток А

## Технічне завдання на науково - дослідну роботу

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан теплоенергетичного  
факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАТВЕРДЖУЮ

\_\_\_\_\_ (керівник підприємства, організації)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на науково-дослідну роботу

«Гідродинаміка і тепло-масообмін в газорідному контактному апараті з ежекційною подачею води»

## 1. Термін виконання роботи

Початок – 08.03. 2020 р.

Закінчення – 15.05. 2020 р.

## 2. Обґрунтування для виконання роботи

Виконати дослідження, що спрямовані на вивчення нового способу подачі рідини в робочу зону контактної апарату та аналіз процесів масообміну в цьому апараті.

## 3. Мета роботи

Оцінити ефективність контактних апаратів; визначити найкращий варіант комплектації контактної апарату з ежекційною подачею рідини в робочу зону; дослідити розподіл повітря та значення його швидкості в контактному апараті.

## 4. Зміст основних етапів виконання роботи

Отримання завдання. Літературний огляд. Розробка установки та контактної апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону. Дослідження характерних режимів течії та умов їх виникнення. Розрахунок теплообміну в контактному апараті з ежекційною подачею рідини в робочу зону. Дослідження газодинаміки контактної апарату в середовищі. Розроблення стартап-проекту. Оформлення та подання дисертації

## 5. Матеріали, що подаються після закінчення роботи

5.1. Магістерська дисертація.

5.2. Довідка про впровадження результатів.

## 6. Порядок розгляду і приймання роботи

Результати роботи розглядаються на засіданні ЕК із захисту атестаційних робіт освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», спеціалізацією «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження».

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (посада, ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Виконавець

Студент гр. \_\_\_\_\_,  
ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Додаток Б**  
**Акт впровадження**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Генеральний директор  
ТОВ «ГЛОБАЛ ІНЖІНІРИНГ СЕРВІС»

«        »        2020

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

Результатів магістерської дисертації студентки другого (магістерського)  
рівня вищої освіти ТЕФ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

**Панченко Оксани Олексіївни**

Результати магістерської дисертації студентки НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» Панченко О.О.. за темою: **«Гідродинаміка і тепло-масообмін в газорідинному контактному апараті з ежекційною подачею води»** повністю відповідають Технічному завданню та використані для розробки, підготовки необхідної документації та техніко-економічних розрахунків контактного теплообмінного апарату з ежекторною подачею рідини в робочу зону з метою подальшого його впровадження на промислових підприємствах України.

Головний спеціаліст центру

«        »        2020

**Додаток В**  
Список наукових праць

Ф.№ 3.3

**СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ** Панченко Оксани Олексіївни

№ п/п	Найменування праць	Рукописні або друковані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5	6
1.	Дослідження тепломасообміну у вертикальному трубному плівковому контактному апараті	Очікується друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науковопрактичної конференції аспірантів. Магістрантів і студентів, м. Київ,	1 стор.	Барабаш П.О
2.	Дослідження оптимальних режимів течії в активній зоні контактного апарату	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науковопрактичної конференції аспірантів. Магістрантів і студентів, м. Київ, 23-26 квітня 2019 р. У 1 т. – К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – Т.1. – С. 262.	1 стор.	Барабаш П.О
3.	Дослідження гідравлічного опору при течії двохфазного потоку у вертикальній трубі	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – Т. 1. – С. 217	1 стор.	Барабаш П.О.
4.	Патент на корисну модель № 121684 «Контактний теплообмінник»	Друк	Від 11.12.2017 МПК F28C 3/06 (2006.01) F24H 1/22 (2006.01)	2 стор.	Барабаш П.О.; Соломаха А.С.; Куделя П.П

1	2	3	4	5	6
5.	Візуалізація процесу в контактній камері ерліфтного типу	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, м. Київ, 25-28 квітня 2017 р. У 2 т. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – Т. 1. – С. 170	1 стор.	Соломаха А.С.
6.	Патент на корисну модель № 128748 «Контактний теплообмінник»	Друк	Від 10.10.2018 року МПК (2018.01) F28C 3/00	2 стор.	Барабаш П.О.; Соломаха А.С.; Куделя П.П
7.	«Режими течення водовоздушного потоку в короткій вертикальній трубі при нижньому підводі фаз»	Друк	Журнал «Инженерно-физический журнал» НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА- 2020. ТОМ 93, No 2 (МАРТ–АПРЕЛЬ)- С.458	8 стор.	Барабаш П.О.; Соломаха А.С.; Гуров А.І.
8.	Генератор пароповітряної суміші для системи живлення двигуна внутрішнього згорання. Дослідження гідродинаміки та аеродинамічного опору	На правах рукопису	Робота на XVII Всеукраїнський конкурс «Молодь – енергетиці України – 2017-2018: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків», 2-ге призове місце	22 стор.	Барабаш П.О.
9.	Особливості використання зрідженого газу на автомобільному транспорті	На правах рукопису	Робота на XVII Всеукраїнський конкурс «Молодь – енергетиці України – 2018-2019: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків», 1-ше призове місце	20 стор.	Соломаха А.С.

Автор

Панченко О.О.

## Додаток Г

### Перевірка на академічний плагіат



Власник документу:  
Гавриш Андрій Сергійович

ID перевірки:  
1002728858

Дата перевірки:  
05.05.2020 12:48:19 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
05.05.2020 12:50:01 EEST

ID користувача:  
77138

Назва документу: Panchenko\_Oksana\_magistr

ID файлу: 1002742425 Кількість сторінок: 36 Кількість слів: 8326 Кількість символів: 63367 Розмір файлу: 1.29 MB

## 7.04% Схожість

Найбільша схожість: 2.88% з джерело [https://tef.kpi.ua/files/pdf/1tezi\\_tom1\\_1524728051.pdf](https://tef.kpi.ua/files/pdf/1tezi_tom1_1524728051.pdf)

6.92% Схожість з Інтернет джерелами

13

Page 38

0.22% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту

3

Page 38

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів

14